

Gaskinetik

Gasdruck- mittlere Energie der Teilchen

Temperatur - mittlere Energie der Teilchen

Geschwindigkeit der Teilchen

Frage: Wie schnell bewegen sich die Teilchen in einem Gas?

$$\bar{E}_k = 3/2 k T$$

Gehen wir von der Boltzmann-Beziehung aus:

$$(m \cdot v_m^2)/2 = 3/2 k T$$

Daraus ergibt sich durch Umformen:

$$v_m = \sqrt{(3 k T)/m}$$

Die mittleren Teilchengeschwindigkeiten nehmen mit der Wurzel aus der Temperatur zu, leichte Teilchen sind im Durchschnitt schneller als schwere

Ex: Welche mittlere Geschwindigkeit besitzt ein Sauerstoffmolekül bei 22°C ?

Frage: Wie sieht die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen aus?

Maxwellsch'sche Geschwindigkeitsverteilung:

From:

<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - Wiki

Permanent link:

<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:wl:gaskinetik>



Last update: **2018/02/20 20:08**

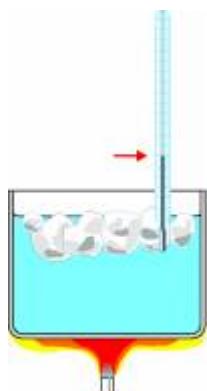
Phasenübergang fest-flüssig / fest-gasförmig

Schmelzen und Erstarren

M Schmelzen und Schmelzwärme

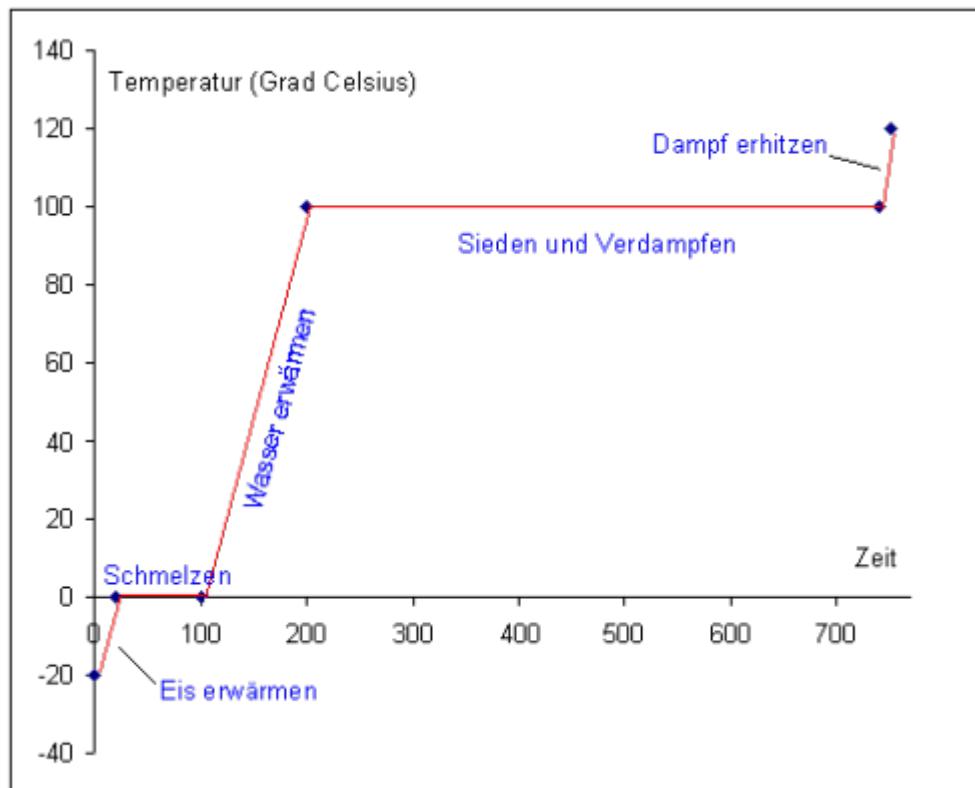
Erwärmst man einen festen Körper, so werden die Schwingungen seiner Moleküle immer heftiger. Schließlich können die Molekularkräfte die Moleküle nicht mehr an festen Plätzen halten. Die geordnete Struktur des Festkörpers bricht bei einer bestimmten Temperatur - der Schmelztemperatur - zusammen, und der Körper wird flüssig.

EXP Schmelzen von Eis



Erwärme eine Mischung aus Eis und Wasser und zeichne ein Diagramm des zeitlichen Verlaufs der Temperatur, bis das Eis vollständig geschmolzen ist. Interpretiere das Diagramm!

Die Temperatur bleibt während des Schmelzens gleich, die gesamte Energie wird zum Aufbrechen der molekularen Bindungen benötigt. Diese Energie heißt **Schmelzwärme**.



Wenn der Körper abgekühlt wird, kehrt sich der Vorgang um. Beim Erstarren wird die zuvor aufgenommene Energie wieder frei.

Schmelzwärme

Die Schmelzwärme pro Kilogramm bei Normaldruck nennt man die **spezifische Schmelzwärme**. Für Eis ist sie besonders groß.

Substanz	kJ/kg	°C
Blei	25	328
Zinn	60	232
Silber	105	961
Kupfer	205	1085
Kochsalz	500	801
Eisen	260	1535
Eis	334	0

Spezifische Schmelzwärme und Schmelzpunkt einiger Substanzen

Zum Schmelzen eines Festkörpers wird Wärme (Schmelzwärme) benötigt. Um 1 kg Eis zu schmelzen, ist die Schmelzwärme von 334 kJ erforderlich.

BEM Spezifische Schmelzwärme von Eis

Die spezifische Schmelzwärme von Eis (`334 (kJ)/(kg*K)`) ist im Vergleich zur spezifischen Wärmekapazität von Wasser von (`4,18 (kJ)/(kg*K)`) sehr groß:
Um 1 kg Eis bei 0°C zu schmelzen, ist ebensoviel Energie notwendig wie für eine anschließende

Erwärmung auf 80 °C.

Deshalb schmelzen Gletscher im Sommer nicht vollständig. Schnee überdauert wegen der hohen Schmelzwärme längere Perioden warmen Wetters. Auch die Eiswürfel im Getränk schmelzen nur langsam.

EX Wärmekissen (Wärmepads)

Bei Phasenumwandlungen wird Energie in einem Körper gespeichert (z.B. beim Schmelzen) oder abgegeben (z. B. beim Erstarren). Da sich dabei die Temperatur nicht ändert, wird diese Energie latente (verborgene) Energie genannt. Anwendung findet dieser Effekt beispielsweise in wiederverwendbaren Wärmekissen. Die verwendeten Materialien werden engl. phase change materials genannt.

Wämrekissen

EX Unterkühltes Wasser

Unterkühltes Wasser

BEM Schmelzen unter Druck

Erhöhung des Drucks führt dazu, dass Eis eine höhere Dichte erreicht (höchste Dichte bei 4°C) → wird Eis auf Grund der Anomalie des Wassers flüssig.



Eine Drahtschlinge wandert durch einen Eisblock.

- VID Druckaufschmelzung

Sublimation und Resublimation

M Direkter Übergang fest-gasförmig

Festkörper gehen manchmal direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über. Diesen Vorgang nennt man **Sublimation**. Die erforderliche Energie wird dem Festkörper entzogen, der sich dadurch abkühlt. Ein kleiner Teil der Moleküle im Eis besitzt ausreichend Energie, um den Molekularkräften zu entkommen und Wasserdampf über der Eisoberfläche zu bilden, zu sublimieren.

Der umgekehrte Vorgang heißt Verfestigung (**Resublimation**).

EX Verdunstung von Schnee

Bei kaltem trockenem Wetter schmilzt Schnee nicht, sondern geht direkt in Wasserdampf über.

EX Trocknen gefrorener Wäsche

In ähnlicher Weise trocknet gefrorene Wäsche im Winter oft schneller als in der feuchten warmen Luft einer geheizten Wohnung.

EX Trockeneis



Trockeneis ist gefrorenes Kohlenstoffdioxid (CO_2), das bei Temperaturen über -78°C und normalem Luftdruck direkt in den gasförmigen Zustand übergeht. (Das Bild zeigt CO_2 -Stücke in gefärbtem Wasser.) Es hat zahlreiche Anwendungen in Technik, Medizin (Vereisen von Warzen) und Unterhaltung (Bühnennebel) und dient als Kühlmittel für den Transport von Medikamenten und Lebensmitteln.

EX Gefriertrocknung

Sublimation wird auch in technischen Prozessen genutzt. In der Lebensmittelindustrie wird z. B. Beerenobst (Müslifrüchte) und Kaffee (Instant-Kaffee) zur Schonung des Aromas durch Gefriertrocknung Wasser entzogen.

EX Eisbelag im Kühlschrank

Die Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank macht sich als Eisbelag im Gefrierfach bemerkbar.

EX Raureif

ist ebenfalls ein Verfestigungsprodukt. Er entsteht an dünnen Gegenständen (Ästen, Blättern) als locker anhaftende und zerbrechliche Eisnadeln. Diese Nadeln bilden sich aus dem Wasserdampf bei sehr feuchter Luft, schwachem Wind und tiefen Temperaturen.



Raufreif an einem Blatt

From:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - **Wiki**

Permanent link:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:wl:fest-fluessig>



Last update: **2018/02/21 08:33**

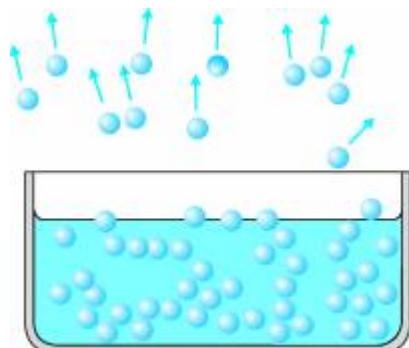
Phasenübergang flüssig-gasförmig

Verdunstung

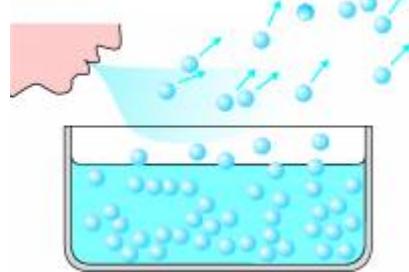
LF Lässt man ein Gefäß mit Wasser längere Zeit offen stehen, so wird das Wasser allmählich immer weniger. Wohin verschwindet es?

Das Wasser **verdunstet**. In einer Flüssigkeit haben nur wenige Moleküle ausreichend Energie, um gegen die Anziehung der Molekularkräfte den Molekülverband zu verlassen. Über der Wasseroberfläche bilden sie die gasförmige Phase von Wasser - den **Wasserdampf**.

Manche Moleküle werden infolge der Molekularbewegung wieder vom Dampf ins Wasser zurückkehren. Man kann dies verhindern, indem man z.B. den Dampf wegbläst. Auch durch Diffusion wandern Moleküle weg. Da in diesem Fall das flüssige Wasser fortwährend Moleküle an den Dampf abgibt, aber nur wenige Moleküle zurückkehren, wird die Verdunstung begünstigt.



Flüssigkeit verdunstet: Die schnellsten Moleküle überwinden die anziehenden Molekularkräfte.



Durch Blasen kann man die Dampfmoleküle entfernen, bevor sie in die Flüssigkeit zurückkehren. Indem die energiereichsten Moleküle entfernt werden, sinkt die Temperatur der Flüssigkeit.

M Verdunstung

Bei einer **Verdunstung** geht ein Stoff vom **flüssigen in den gasförmigen Zustand** über, ohne dabei die **Siedetemperatur** zu erreichen.

Zur Verdunstung kommt es, wenn die Gasphase über der Flüssigkeit noch nicht mit Dampf gesättigt ist.

EX Haarföhn

Daher trocknet z.B. Wäsche im Wind rascher und ein Föhn lässt nasse Haare schnell trocknen.

EX Schwitzen

Indem das Wasser die schnellsten Moleküle verliert, nimmt die mittlere Molekülgeschwindigkeit ab. Das Wasser wird kälter. Der Schweiß verdunstet und der Körper kühl ab.

Ebenso wird feuchte Badewäsche oft als kalt empfunden.

EX Lokalanästhesie

In der Medizin benützt man die Verdunstungskälte bei der Anästhesie - die Haut wird weniger schmerzempfindlich, wenn man z. B. Chlorethan auf ihr verdunsten lässt.

F Warum bläst man über eine heiße Suppe?

Aus der Suppe verdunsten die schnellsten Moleküle. Durch das Blasen werden sie wegtransportiert, die Suppe wird dadurch schneller kühl.

F Warum trocknet Wäsche im Wind schneller?

Aus der Wäsche verdunsten Wassermoleküle. Der Wind entfernt die Moleküle und beschleunigt so das Trocknen.

F Was geschieht beim Aufbringen eines Kältesprays auf die Haut?

Die Temperatur sinkt, weil beim Verdunsten die energiereichsten Moleküle den Flüssigkeitsverband verlassen. Die zurückbleibenden Moleküle haben geringere Energie, das bedeutet eine niedrigere Energie der Flüssigkeit.

Dampfdruck

Dampfdruck

Um den Übergang flüssig-gasförmig besser untersuchen zu können, müssen wir das Verdunsten der Flüssigkeit verhindern.

Dazu schließen wir sie in einem geschlossenen Gefäß ein. Energieriche Moleküle verlassen die Flüssigkeitsoberfläche und bewegen sich im Raum über der Flüssigkeit, gleichzeitig kehren Moleküle in die Flüssigkeit zurück. Es bildet sich ein **dynamisches Gleichgewicht** zwischen Verdunstung und

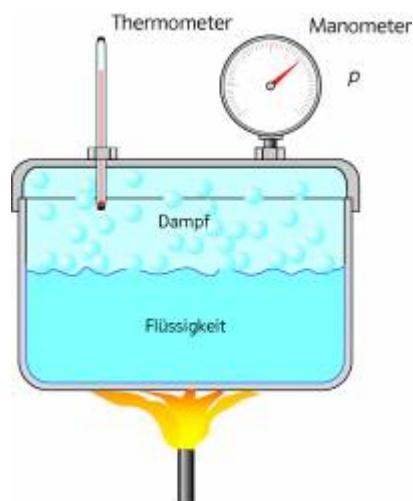
Kondensation aus. Eine konstante Dichte des Dampfs stellt sich ein, deren Größe nur von der Temperatur abhängt.

Der mit der Flüssigkeit im Gleichgewicht stehende Dampf heißt **gesättigter Dampf**. Sein Druck auf die Flüssigkeitsoberfläche und die Gefäßwand heißt **Dampfdruck** der Flüssigkeit.

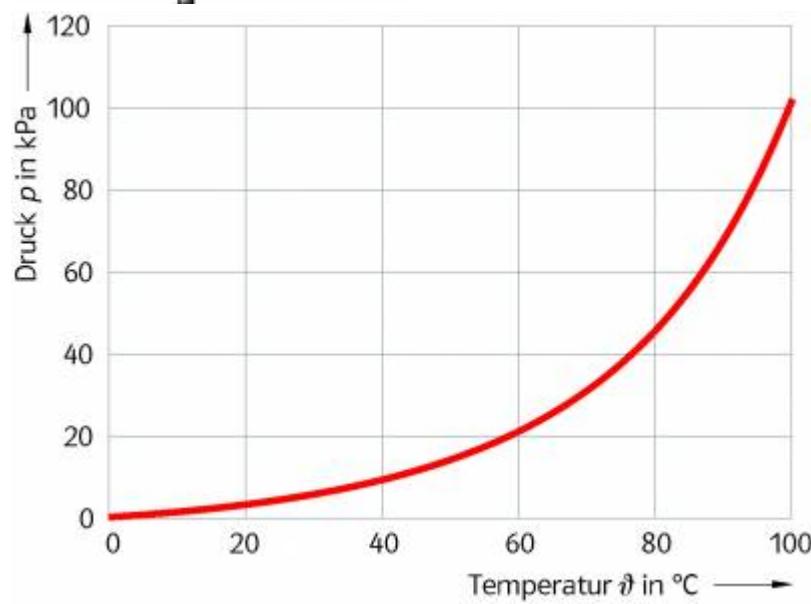
LF Wie ändert sich der Dampfdruck mit der Temperatur?

Hinweis: Meist befindet sich im Raum über der Flüssigkeit zusätzlich Luft, und der Druck über der Flüssigkeit setzt sich aus dem Dampfdruck und dem Druck der eingeschlossenen Luft zusammen. Um nur den Dampfdruck zu untersuchen, sollten wir zunächst die Luft entfernen. Wir haben dann im Gefäß einen einzigen Stoff (z.B. Wasser) in zwei Zuständen (flüssig und gasförmig).

EXP Gesättigter Dampf



Wie verhält sich der Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur?



Der Sättigungsdampfdruck von Wasser zwischen 0°C und 100°C steigt nahe dem Siedepunkt steil an. Im Diagramm trennt die Dampfdruckkurve den flüssigen Zustand vom gasförmigen Zustand. Die Punkte auf der Kurve beschreiben Wasser im Gleichgewicht des flüssigen mit dem gasförmigen Zustand. Im Bereich von 0 °C bis 100 °C steigt der Dampfdruck von 6 mbar auf 1013 mbar. Im Bereich links von der Kurve gibt es nur flüssiges Wasser, rechts nur gasförmiges Wasser.

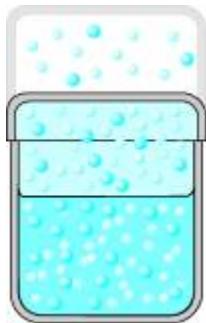
BEM Dampf ist kein ideales Gas

Die Dampfdruckkurve zeigt auch, dass im Gegensatz zum Verhalten eines idealen Gases der

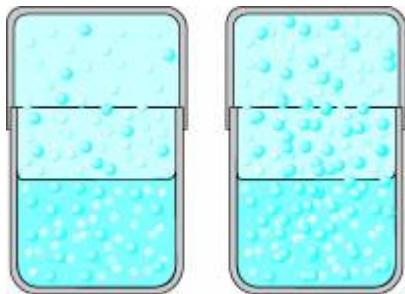
Dampfdruck nicht proportional zur Temperatur ansteigt, sondern stärker.

Begründung: Im idealen Gas bleibt die Teilchenzahl gleich, der Druck steigt proportional zur Temperatur. Im System Flüssigkeit-Gas steigt bei Temperaturerhöhung einerseits die mittlere kinetische Energie der Moleküle, und andererseits verlassen mehr Moleküle die Flüssigkeit. Es stellt sich ein neues dynamisches Gleichgewicht bei einem höheren Dampfdruck ein.

LF Ändert sich der Dampfdruck, wenn wir das Dampfvolumen verändern?



Vergrößert man das Volumen des Dampfes bei gleich bleibender Temperatur, so nehmen zunächst Dichte und Druck ab. Bis die ursprüngliche Dichte des Dampfes wieder erreicht ist, können mehr Moleküle die Flüssigkeit verlassen als in sie zurückkehren. Solange noch Flüssigkeit vorhanden ist, hängen die Dampfdichte und der Dampfdruck über der Flüssigkeit daher nicht vom Volumen ab.



Der Druck eines gesättigten Dampfes steigt mit wachsender Temperatur, ist aber unabhängig vom Volumen.

LF Was versteht man unter der kritischen Temperatur einer Flüssigkeit?

Die Dampfdruckkurve endet abrupt beim kritischen Punkt, einem für die Flüssigkeit charakteristischen Wert von Druck und Temperatur. Bei Wasser betragen die kritische Temperatur $T_k=374,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und der kritische Druck $p_k=221,15\text{ bar}$. Am kritischen Punkt verschwindet der Unterschied zwischen Flüssigkeit und Gas. Die thermische Bewegung ist nun so stark, dass die Teilchen auch bei noch größerem Druck nicht an ihre nächsten Nachbarn gebunden bleiben. Über dem kritischen Punkt gibt es nur noch Gas.

Gas	K	°C
Wasserdampf	647,3	374
Kohlendioxid	304,1	31
Sauerstoff	154,7	-118
Stickstoff	126,3	-147
Wasserstoff	33,2	-240
Helium	5,2	-268

Kritische Temperatur einiger Gase. Gase können nur unterhalb der kritischen Temperatur verflüssigt werden.



VID Kritischer Punkt von Freon

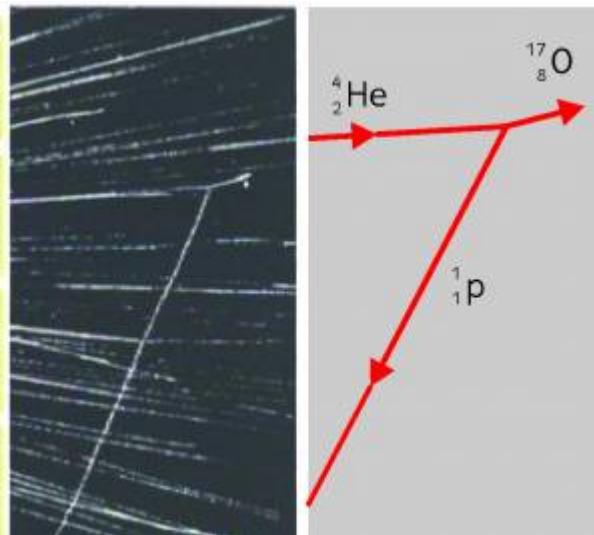
BEM Technische Bedeutung der kritischen Temperatur

Die Dampfdruckkurve des Wassers ist technisch sehr wichtig. Beispielsweise arbeiten Dampfturbinen in Wärmekraftwerken umso effektiver, je höher die Dampftemperatur ist. Hohe Temperaturen von über 500 °C und Drücke von über 100 bar stellen an das Material von Dampfkessel und Turbinenschaufeln hohe Anforderungen.

EX Übersättigter Dampf - Wilson'sche Nebelkammer

Der schottische Physiker [WCharles T. R. Wilson](#) (1869-1959) konnte als Erster im Jahr 1911 die Flugbahnen von α -Teilchen sichtbar machen. Das Prinzip der von ihm entwickelten Nebelkammer nutzt die Eigenschaften von Dämpfen: In einem geschlossenen Gefäß verdampft Alkohol und bildet gesättigten Dampf. Das Gefäß ist durch einen verschiebbaren Kolben verschlossen. Durch rasches Herausziehen des Kolbens wird das Volumen der Kammer plötzlich vergrößert. Dadurch sinken Druck und Temperatur schlagartig, da in der kurzen Zeit der Expansion kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Nun ist für die niedrigere Temperatur zu viel Dampf vorhanden, der Dampf ist übersättigt. Der übersättigte Dampf sollte teilweise kondensieren, damit sich wieder ein Gleichgewichtszustand einstellt. Kleine Flüssigkeitströpfchen bilden sich jedoch nur, wenn Kondensationskeime vorhanden sind. Hier kommt nun die Radioaktivität ins Spiel.

α -Teilchen, die von einem Mineral ausgehen, das Uran enthält, Teilchen der kosmischen Strahlung und andere ionisierende Teilchen erzeugen längs ihrer Bahnen Ionen, die als Kondensationskeime wirken: Kleine Flüssigkeitströpfchen (Nebeltröpfchen) entstehen. Die Flugbahnen der ionisierenden Teilchen werden sichtbar. Viele Jahrzehnte lang wurden Nebelkammern in der Forschung genutzt, bis sie von elektronischen Nachweisgeräten abgelöst wurden. Heute regen sie in naturwissenschaftlichen Museen Menschen zu Fragen an.



Spuren von ionisierenden Teilchen in einer Nebelkammer. Die Aufnahme zeigt die erste beobachtete Umwandlung eines Atomkerns.

F Welche Aussagen gelten für die schnellsten Moleküle einer Flüssigkeit?

Da stets die schnellsten Moleküle die Flüssigkeit verlassen und in den gesättigten Dampf übertreten gilt:

- a) Der Dampf ist wärmer als die Flüssigkeit.
- b) Der Dampf ist gleich warm wie die Flüssigkeit.
- c) Der Dampf ist kühler als die Flüssigkeit.

Begründe deine Auswahl!

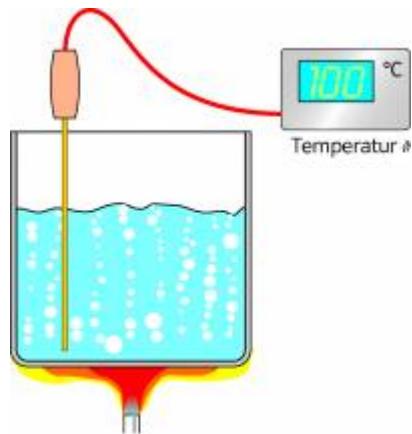
F Wie ändert sich der Dampfdruck, wenn die Temperatur steigt?

- a) Der Dampfdruck steigt.
- b) Der Dampfdruck sinkt.
- c) Der Dampfdruck ändert sich nicht.

Sieden

LF Was passiert beim Sieden einer Flüssigkeit?

EXP Erhitzen von Wasser in einem offenen Gefäß



Während des Siedens bleibt die Temperatur konstant.

Zunächst beobachten wir, wie die Verdunstung im offenen Gefäß stärker wird. Durch Konvektion gelangt Wasser, das am heißen Gefäßboden erwärmt wird, an die Oberfläche. Der Dampfdruck nimmt mit der Temperatur zu, immer mehr Teilchen treten aus der Flüssigkeit in die Luft aus. Durch Konvektion werden sie abtransportiert und es kann sich kein Gleichgewicht zwischen Flüssigkeit und Dampf einstellen.

Wenn aber z.B. am Gefäßboden die Temperatur so hoch ist, dass der Dampfdruck größer als der hydrostatische Druck in der Flüssigkeit ist, bilden sich an mikroskopisch kleinen Verunreinigungen oder Unregelmäßigkeiten innerhalb der Flüssigkeit Dampfbläschen: Dort reicht die Bewegungsenergie der Teilchen, um die Bindung zwischen den Wassermolekülen zu lösen. Wegen ihrer geringeren Dichte steigen Dampfbläschen durch Auftrieb zur Oberfläche und transportieren dabei Energie. Wenn auch das Wasser an der Oberfläche die **Siedetemperatur** ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einem Druck von 1013 mbar) erreicht hat, ist der Dampfdruck an der Oberfläche gleich dem Umgebungsdruck (Luftdruck). Die Wassermoleküle entweichen nun ungehindert, was eine gesteigerte Wärmeabfuhr bewirkt. Daher bleibt die Temperatur der Flüssigkeit auch bei weiterer Wärmezufuhr konstant. Die zugeführte Energie bewirkt ein weiteres Verdampfen.

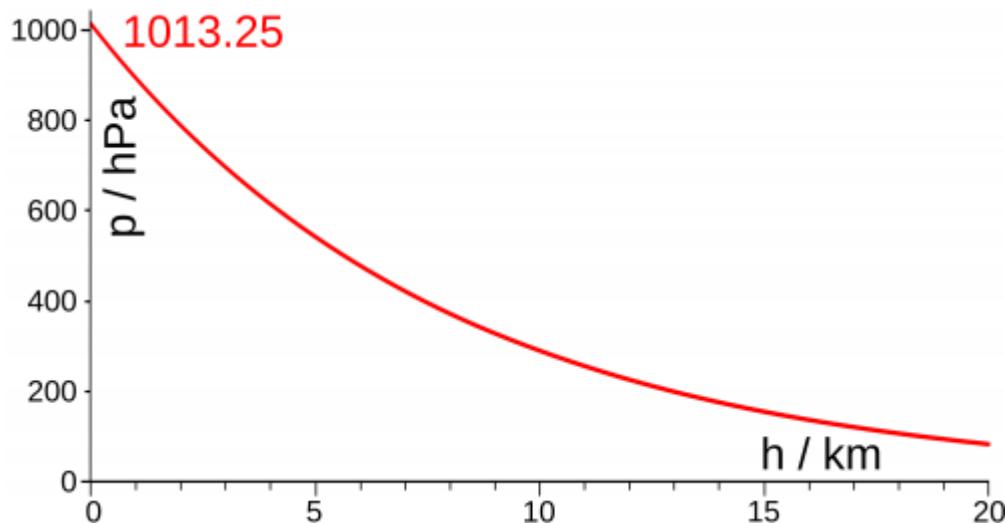
Sieden

Die **Verdampfung aus dem Inneren der Flüssigkeit** heißt **Sieden**. Sieden tritt ein, wenn der **Dampfdruck dem Luftdruck entspricht**.

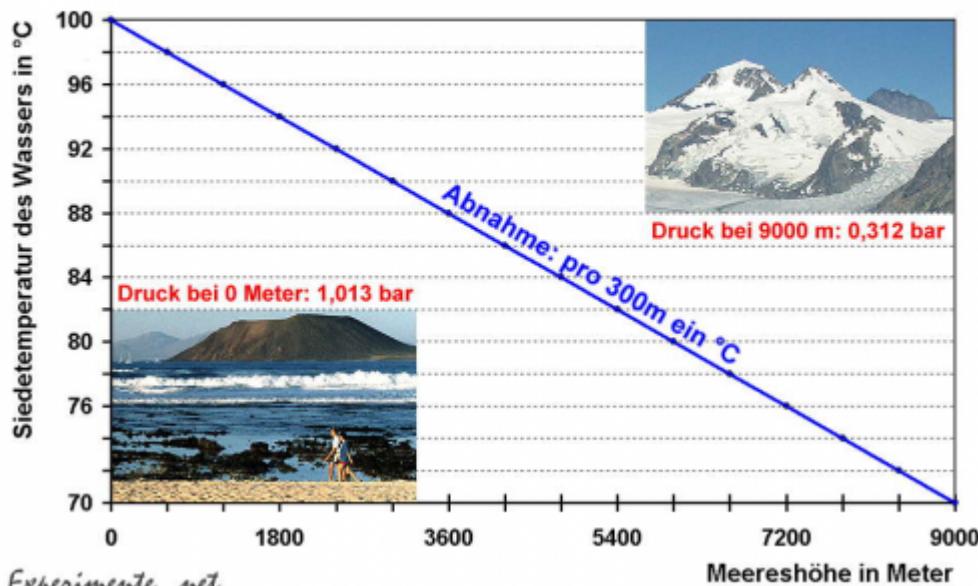
LF Wie hängt die Siedetemperatur vom Luftdruck ab?

Bei niedrigerem Luftdruck siedet Wasser unterhalb von $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z.B. siedet Wasser am Mount Everest bei etwa $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, der Luftdruck beträgt dort etwa ein Drittel des Luftdrucks auf Meeressniveau.

m	0	903	1804	3000	4191	5382	6565	7741	8910
°C	100	97	94	90	86	82	78	74	70
mbar	1013	909	814	701	601	513	436	370	312



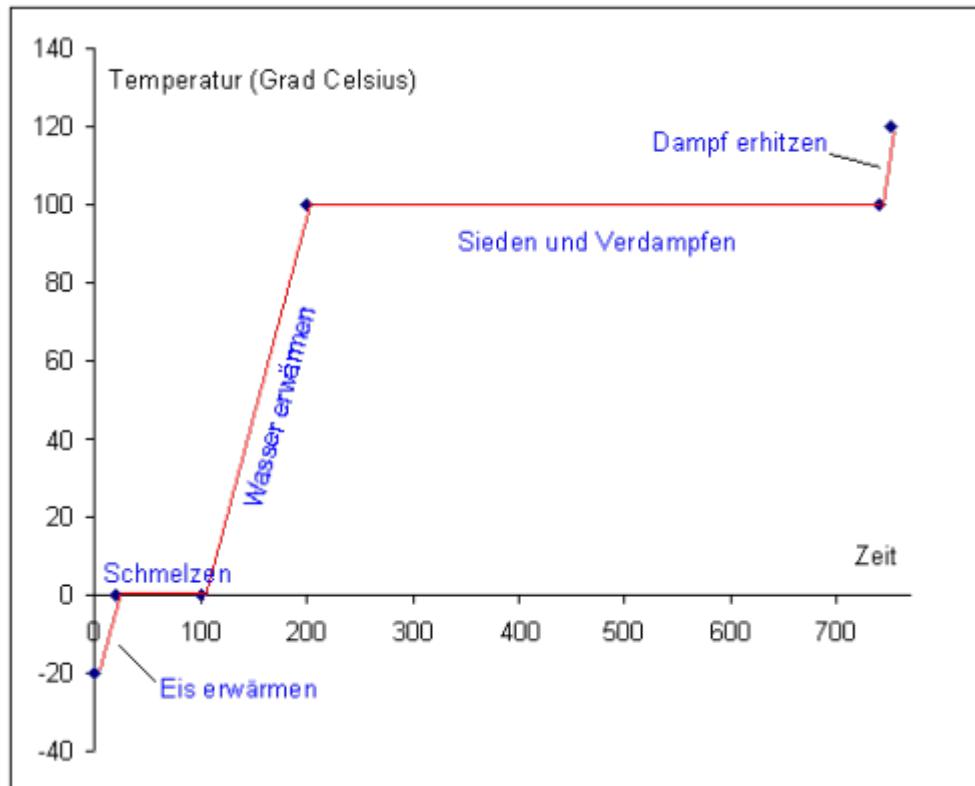
Siedepunkt des Wassers in Abhängigkeit von der Meereshöhe



Experimente . net

VID Tee im Gebirge

Verdampfungswärme



Nach Erreichen der Siedetemperatur bleibt die Temperatur der Flüssigkeit trotz Wärmezufuhr konstant. Die zugeführte Wärme dient nur zur Überwindung der Molekularkräfte (Trennen der Wasserstoffbrückenbindungen) beim Übergang von der Flüssigkeit in den Dampf.

Substanz	kJ/kg
Aluminium	10900
Wasser	2257
Alkohol	844
Benzol	396

Spezifische Verdampfungswärmen einiger Substanzen

Die **spezifische Verdampfungswärme** von Wasser beträgt **2257 kJ/kg**.

Kondensationswärme

Kühlt man Wasserdampf unter die Siedetemperatur, so binden die zwischenmolekularen Kräfte die Moleküle erneut aneinander. Der meiste Wasserdampf kondensiert zu flüssigem Wasser. Dabei gibt er die zuvor aufgenommene **Verdampfungswärme als Kondensationswärme** wieder ab. Einige Moleküle bleiben als Dampf über der Flüssigkeit. Wasserdampf kondensiert an Flächen (z.B. Bildung von Tau) oder mikroskopisch kleinen Körpern, wie Wassertröpfchen oder Staubkörnern (z.B. Wolkenbildung; Smog, smoke + fog).

Siedeverzug

Dampfblasen entstehen an mikroskopisch kleinen Verunreinigungen. Bei sehr reinen Substanzen kann die Phasenumwandlung weit über den Siedepunkt, bzw. unter den Gefrierpunkt verzögert werden. Bei

Siedeverzug ist die Flüssigkeit **überhitzt**, ihre Temperatur ist höher als der normale Siedepunkt.

BEM Siedeverzug kann gefährlich werden

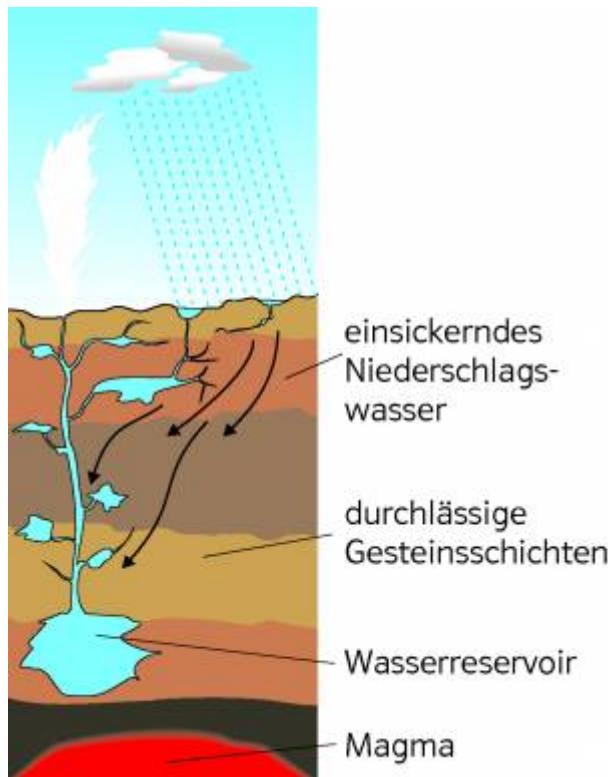
Eine kleine Störung, z.B. eine Erschütterung, lässt die Flüssigkeit schlagartig verdampfen. Die explosionsartige Volumenausdehnung auf etwa das 1700-fache kann zu schweren Unfällen führen. Daher verwendet man in der Chemie sog. Siedesteinchen, an deren porösen Oberflächen sich Dampfblasen bilden.

EX Geysire



Geysire zeigen eindrucksvoll die Wirkung von überhitzen Wasser (Siedeverzug) in der Natur.

Das Foto zeigt den Geysir Old Faithful im Yellowstone-Park(USA).



In vulkanischen Gebieten kann Sickerwasser in tief reichenden Spalten weit über 100°C erreichen. Der Druck der darüber-liegenden Wassersäule kann lange Zeit das Sieden verhindern. Wenn schließlich doch Dampfblasen aufsteigen, reißen sie Wasser mit sich. Durch den verringerten Wasserdruck setzt Sieden ein: Ein Gemisch aus heißem Dampf und Wasser schießt als Fontäne aus dem Spaltensystem.

F Wovon hängt die Siedetemperatur einer Flüssigkeit ab?

- a) Vom äußeren Luftdruck

- b) Vom Dampfdruck
- c) Vom Volumen

F Wie hoch ist die Siedetemperatur von Wasser auf dem 3789m hohen Großglockner und auf dem 5895m hohen Kilimandscharo?

F Welche Probleme kann der niedrige Luftdruck in Höhen über 7 000 m verursachen?

F Ist es sinnvoll, Teewasser im Wasserkocher lange sieden zu lassen? Wird es dadurch heißer? Wie viel Wasser könnte man mit der Verdampfungswärme von 1kg Wasser von 20°C auf 100°C erwärmen?

F Warum verursacht Wasserdampf von 100°C schwerere Verbrühungen als Wasser von 100°C ?

F Was versteht man unter Kondensationswärme und wie hängt sie mit der Verdampfungswärme zusammen?

From:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - Wiki



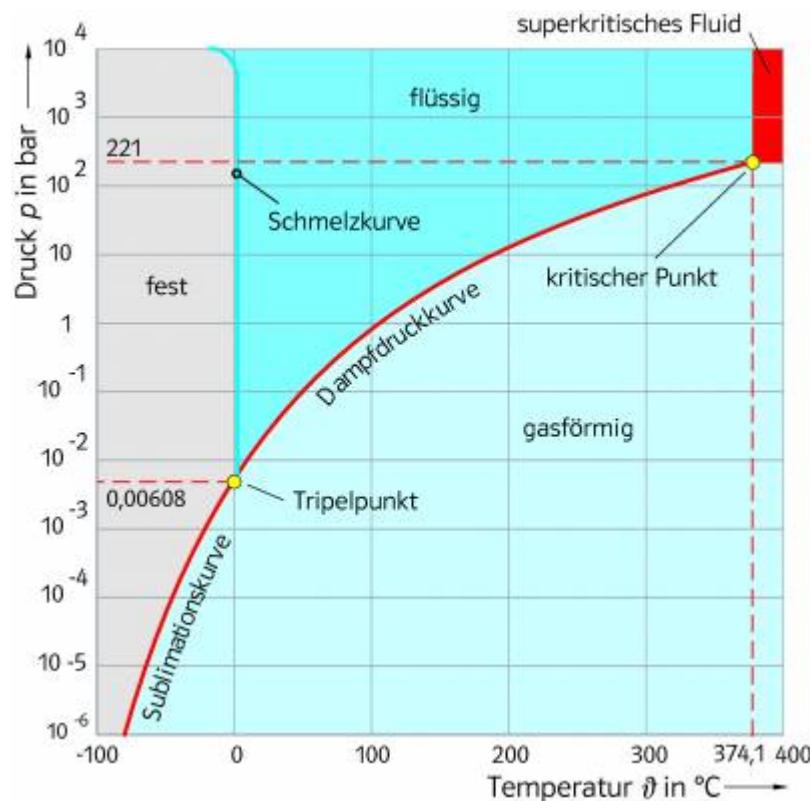
Permanent link:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:wl:fluessig-gasf>

Last update: **2018/03/07 11:04**

Zustandsdiagramm eines Stoffes

Zustandsdiagramm von Wasser

Einen Überblick über die Phasenübergänge eines Stoffes erhält man, wenn man in einem Druck-Temperatur-Diagramm den Schmelz-, den Dampf- und den Sublimationsdruck als Funktion der Temperatur einzeichnet.



*Das Zustandsdiagramm von Wasser
Die Dampfdruckkurve endet im
kritischen Punkt. Über dem
kritischen Punkt kann die Flüssigkeit
vom Gas nicht unterschieden
werden. Der Tripelpunkt ist eine
Fundamentalkonstante für Wasser.
Es existieren hier alle 3 Phasen
gleichzeitig.*

Beschreibung

Die drei Druck-Temperatur-Kurven trennen Gebiete voneinander, in denen nur der feste oder nur der flüssige oder nur der gasförmige Aggregatzustand existiert. Jeder Punkt auf einer der Kurven bedeutet, dass jeweils zwei Zustände - z.B. fest und flüssig - gleichzeitig vorkommen. Es sind Punkte, in denen Phasenübergänge stattfinden.

Alle drei Kurven laufen in einem Punkt zusammen. Dieser Punkt heißt Tripelpunkt. Er gibt an, bei welchem Druck und bei welcher Temperatur alle Phasen des jeweiligen Stoffs gleichzeitig vorkommen.

Während Schmelz- und Siedetemperaturen eines Stoffes und daher auch alle darauf aufbauenden Temperaturskalen vom Luftdruck abhängen, ist der Tripelpunkt vom Luftdruck unabhängig: Er ist daher für die Definition einer Temperaturskala besonders geeignet. Für die Kelvinskala wird der Tripelpunkt von reinem Wasser bei $T = 273,16\text{ K}$ und $p = 610\text{ Pa}$ als Fixpunkt benutzt. Als Temperaturunterschied von 1 K ist der $273,16\text{ te}$ Teil des Abstands zwischen dem absoluten Nullpunkt und dem Tripelpunkt des Wassers definiert.

From:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - **Wiki**



Permanent link:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:wl:zustandsdiagramm>

Last update: **2016/04/25 17:09**

Wasser in der Luft

Luftfeuchtigkeit

F Aus welchen Bestandteilen setzt sich die Luft zusammen?

Die Luft der Erdatmosphäre enthält als wichtigste Gase

- Stickstoff `N_2` (ca. 78%),
- Sauerstoff `O_2` (ca. 21%),
- Argon `Ar` (0,9%),
- Kohlenstoffdioxid `CO_2` (0,04%)
- und - in wechselnden Mengen - Wasserdampf (bis 0,4%).

Jedes dieser Gase trägt entsprechend seinem Volumenanteil zum gesamten Luftdruck bei.

M Sättigungsdichte von Wasserdampf

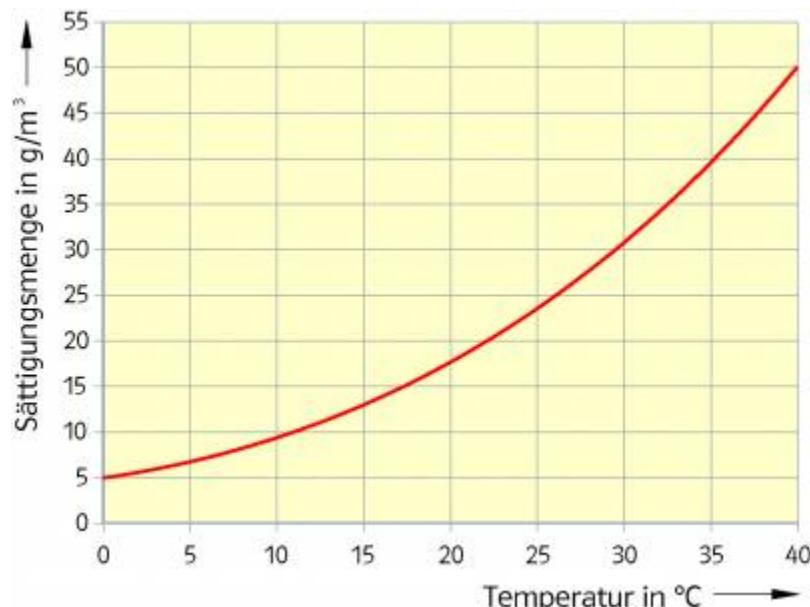
Ständig verdunstet Wasser aus den Meeren. Dadurch gelangt Wasserdampf in die Atmosphäre und wird durch Wind weiter transportiert. Aus warmen Meeresoberflächen verdampft mehr Wasser als aus kalten. (Der Beitrag von Flüssen und Seen kann kleinräumig wichtig sein.)

Die **maximale Menge an Wasserdampf**, die Luft bei einer **bestimmten Temperatur pro Kubikmeter** enthält, heißt **Sättigungsdichte**.

Wie viel Wasserdampf maximal in der Atmosphäre enthalten sein kann, hängt von der Temperatur ab. Bei hohen Temperaturen kann sie mehr Wasserdampf enthalten als bei niedrigen. Die Dampfdichte wird in `g/m^3` angegeben.

Die folgende Abb. zeigt die Sättigungsdichte (Dichte von gesättigtem Wasserdampf) als Funktion der Temperatur.

Bei 0°C beträgt sie ca. `5 g/m^3`, d.h. bei 0°C können in `1 m^3` Luft höchstens 5 g Wasserdampf enthalten sein. Bei 20°C sind es ca. `17 \text{g}/\text{m}^3`, und bei 100 °C fast `600 \text{g}/\text{m}^3`.



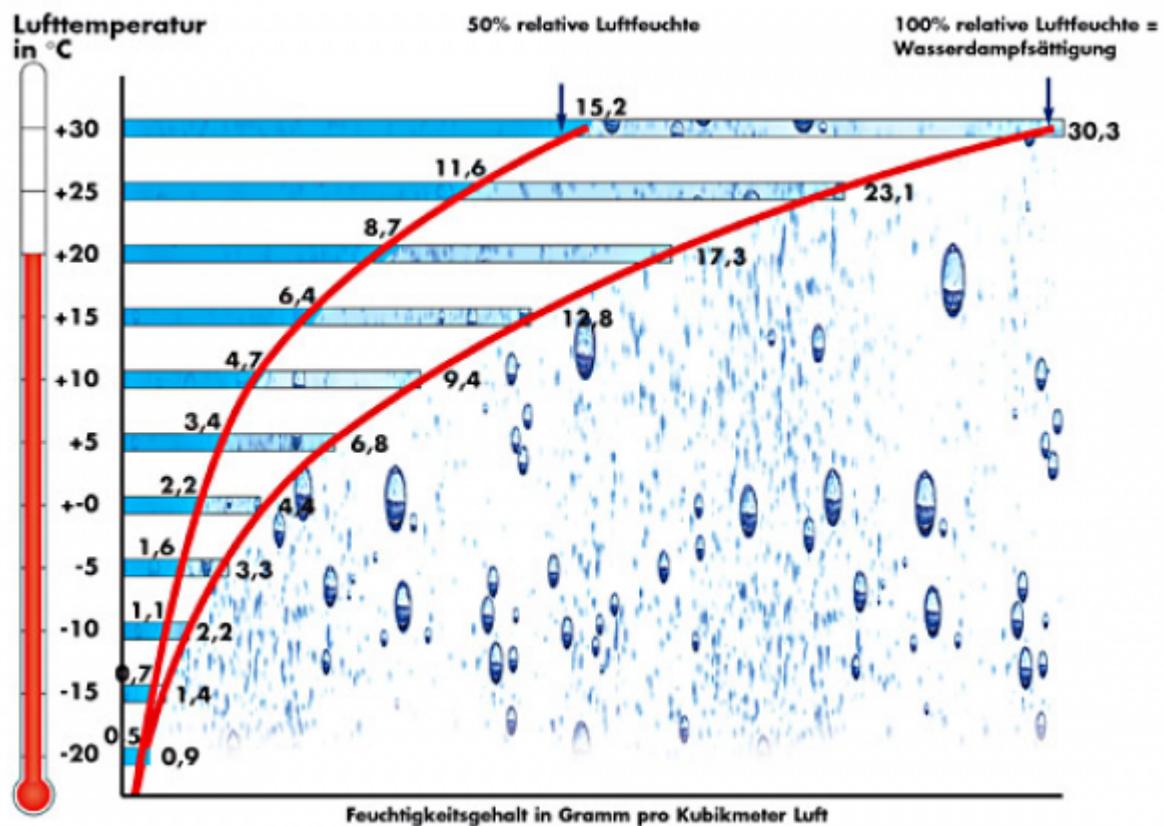
Die Sättigungsdichte von Wasserdampf nimmt mit der Temperatur schnell zu.

M Absolute und relative Luftfeuchtigkeit

Die tatsächliche Wasserdampfdichte wird als absolute Feuchtigkeit bezeichnet. Meist ist sie erheblich von der Sättigungsdichte entfernt.

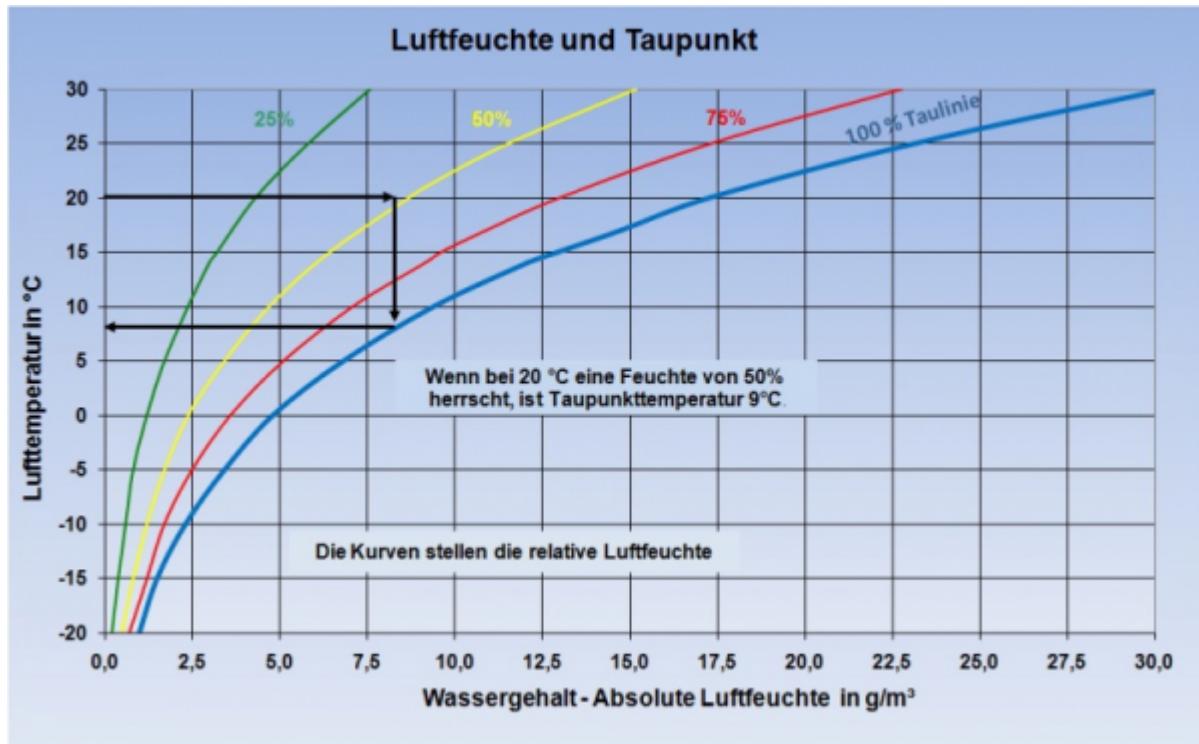
Die Wasserdampfdichte in Luft heißt **absolute Feuchtigkeit**.

Die **relative Feuchtigkeit** gibt das **Verhältnis der absoluten Feuchtigkeit zur Sättigungsdichte** in Prozent an.

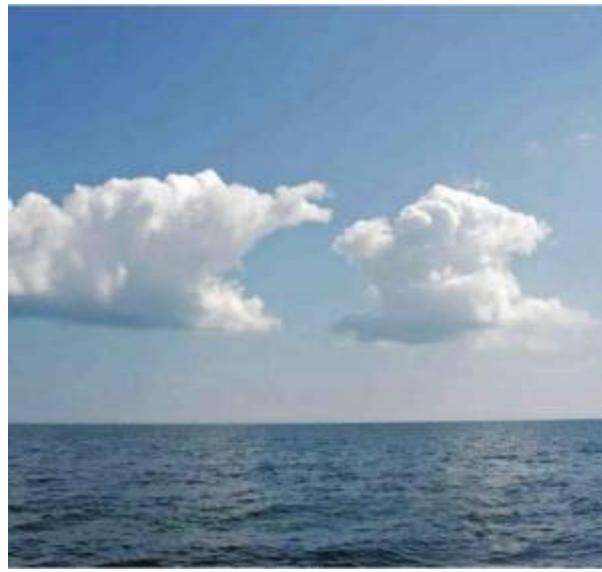


BEM Kondensation durch Abkühlung

Wenn z. B. durch Abkühlen die Wasserdampfdichte die jeweilige Sättigungsdichte erreicht, enthält die Luft gesättigten Wasserdampf. Der Dampf beginnt zu kondensieren, er bildet Flüssigkeitströpfchen (Nebel, Wolken, Regen, Tau). Man sagt, dass der Taupunkt erreicht ist.



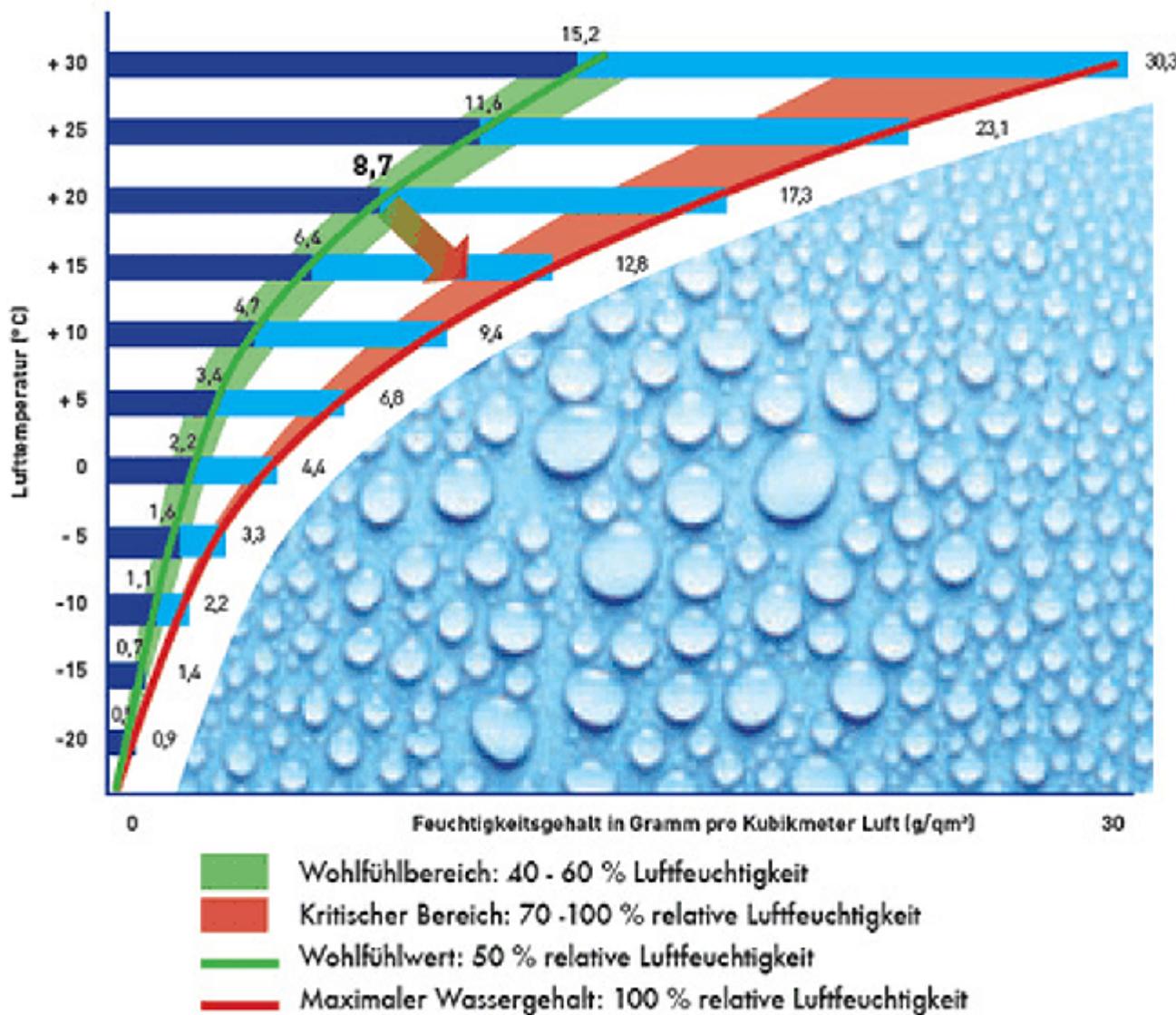
EX Wolkenbildung



Übersättigter Wasserdampf kondensiert.

Er bildet Wassertröpfchen oder Eiskristalle und wird in Form von Wolken sichtbar. Wasserdampf ist hingegen unsichtbar. Die sichtbaren Dampfschwaden über siedendem Wasser sind Nebel und bestehen aus Wassertröpfchen.

BEM Luftfeuchtigkeit und Wohlbefinden



Die Feuchtigkeit der Luft hat für unser Wohlbefinden große Bedeutung.

Bei zu hoher Luftfeuchtigkeit in Gebäuden kondensiert Wasserdampf an kalten Wänden, an Fenstern, und Leitungsrohren, sie kann zu Schimmelbildung und zu einem ungesunden Wohnklima führen. Zu geringe Feuchtigkeit lässt - besonders in der Heizperiode - die Atmungsorgane austrocknen. Zu große Feuchtigkeit bei hoher Lufttemperatur empfinden wir als schwül, Schweiß kann nicht mehr verdunsten.

Eine relative Luftfeuchtigkeit von 50-60 % wird als angenehm empfunden.

EX Flüssigkeitsverlust

Nicht nur durch Schwitzen, sondern auch durch Atmen verliert man Wasser, dies besonders im Winter wegen der geringen Luftfeuchtigkeit bei tiefen Temperaturen. In der Lunge ist die Atemluft bei etwa 37°C mit Wasserdampf gesättigt (absolute Feuchtigkeit ca. 44 g/m^3). Bei 0°C Lufttemperatur beträgt die Sättigungsdichte $4,8 \text{ g/m}^3$. Bei 50% relativer Feuchtigkeit beträgt die absolute Feuchtigkeit der Luft beim Einatmen bei 0°C daher $0,50 * 4,8 \text{ g/m}^3 = 2,4 \text{ g/m}^3$.

Vergleiche Temperatur und Feuchtigkeit der Atemluft beim Ein- und Ausatmen. Bei intensivem Sport, z.B. Eislaufen oder Snowboarden, atmet man etwa 60 Liter Luft pro Minute ein und aus. Wie viel

Wasser verliert man dabei innerhalb einer Stunde? Welche Empfehlung würdest du als Betreuer/in abgeben?

Wolkenbildung

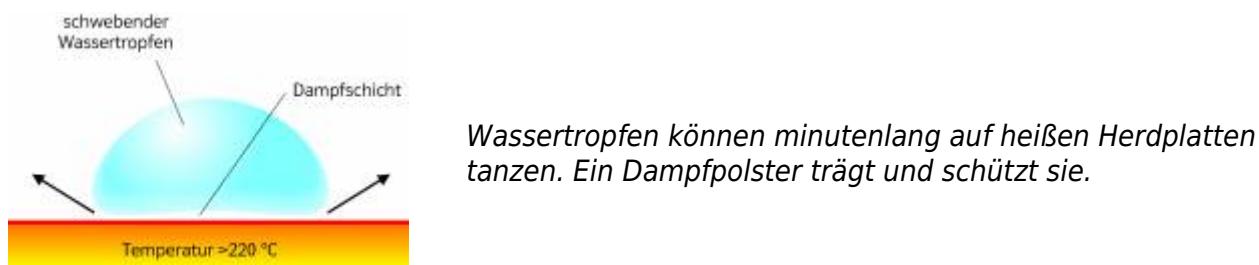
[Wolkenformen](#)

[Entstehung von Wolken](#)

[Entstehung von Föhn](#)

Rund um den Wasserdampf

[Ex Leidenfrost'sches Phänomen](#)



- [VID Leidenfrost'sches Phänomen](#)

[Ex Wasser in heißes Öl - Fettbrand](#)

Beim Verdampfen nimmt das Volumen schlagartig zu - am Siedepunkt bei normalem Luftdruck um den Faktor 1700!

Das macht nicht nur den Siedeverzug so gefährlich, es ist eine häufige Ursache von schweren Unfällen in Küchen und Industriebetrieben.

Wenn Frittierzett in der Pfanne zu heiß wird, verdampft Zett, das sich selbst entzünden kann. Versucht man nun, den sich anbahnenden Zimmerbrand durch Löschen mit Wasser zu verhindern, löst man erst recht eine Katastrophe aus.

Wasser ist schwerer als Zett und sinkt in der Pfanne ins heiße Zett. Beim schlagartigen Verdampfen verteilt es das Zett in einer Wolk aus kleinen Tröpfchen, die nun gleichzeitig in einer Stichflamme verbrennen. Schwere Verbrennungen von Personen und große Sachschäden sind die Folge. (Im Internet sind eindrucksvolle Demonstrationen von Zettbränden zu sehen, mit denen Feuerwehren über die Gefahren informieren.)

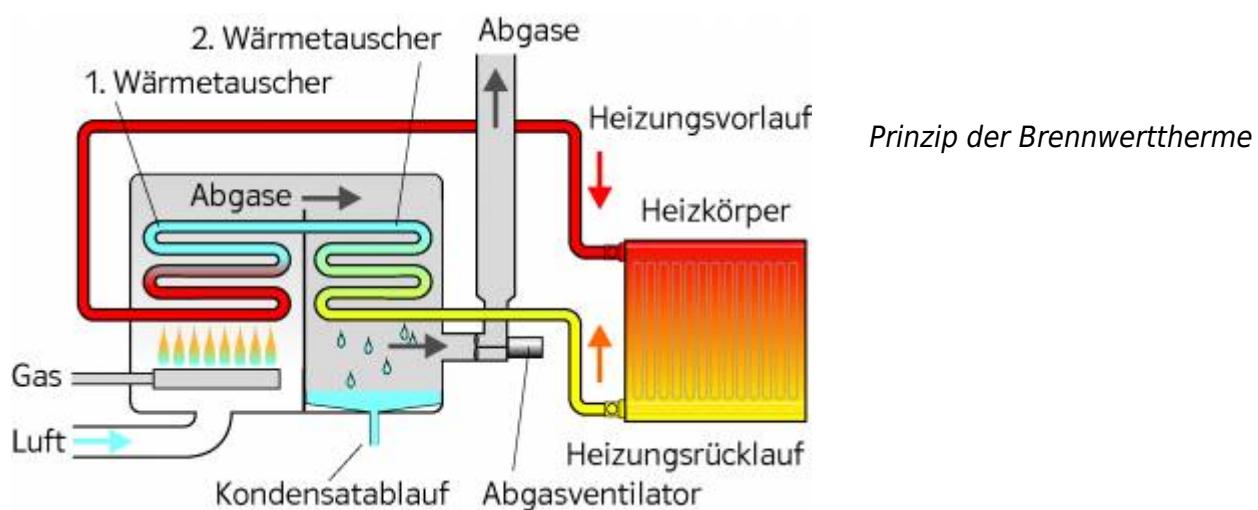
In Industriebetrieben kann es durch den Kontakt von Wasser mit flüssigem Metall zu schweren Unfällen kommen. Wie beim Zettbrand wird dabei flüssiges Metall mit oft tödlichen Folgen für Menschen zerstört.

Ex Energiesparen - die Brennwerttherme

Häufig dient Erdgas zur Warmwasserbereitung und zur Heizung.

Erdgas besteht großteils aus Methan `CH₄`. Beim Verbrennen entsteht gemäß der Reaktion $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ Kohlenstoffdioxid und Wasser.

Die etwa 1200°C heißen Verbrennungsgase heizen den Warmwasserspeicher und verlassen die Brennkammer mit etwa 150 °C. Statt sie direkt in den Abluftkamin zu leiten, lässt man sie zuvor das zurückfließende Wasser der Heizung (Rücklauf) und die angesaugte Verbrennungsluft vorwärmen. Dabei kondensiert der Wasserdampf und gibt die Kondensationswärme ab. Man kann dadurch etwa 10% Erdgas einsparen.



From:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - Wiki

Permanent link:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:wl:luftfeuchte>



Last update: **2018/03/23 11:37**

Wärme, Arbeit und innere Energie

Innere Energie

Was ist innere Energie?

Wenn Energie auf Grund von Temperaturunterschieden auf einen Körper übergeht, dann führt dies entweder

- zu einer Temperaturerhöhung oder
- zu einer Änderung des Aggregatzustands.

Die zugeführte **thermische Energie ist im Körper gespeichert** und kann auf einen kälteren Körper übergehen.

Zusätzlich kann **chemische Energie im System gespeichert** sein, z.B. in der Treibladung von Raketen, in einer Autobatterie oder in Nahrungsmitteln. Man muss sie berücksichtigen, wenn chemische Reaktionen ablaufen.

Die **innere Energie U** eines thermodynamischen Systems umfasst die **thermische Energie** und die **chemische Energie**.

Unter Berücksichtigung der inneren Energie eines Systems können wir den Satz von der Erhaltung der Gesamtenergie allgemein formulieren:

In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie E konstant. Die einzelnen Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Der Erhaltungssatz der Gesamtenergie gehört zu den wichtigsten naturwissenschaftlichen Leistungen des 19. Jhs. Es bedurfte vieler Untersuchungen, bis man von der Gültigkeit des Satzes überzeugt sein konnte. [WJulius Robert Mayer](#) hat als erster den Zusammenhang von Wärme und mechanischer Arbeit erkannt.

EX Heliumballon

Ein Ballon sei mit einem Mol Helium (4g) gefüllt, er hat bei Normalbedingungen (0°C, 1013mbar) ein Volumen von 22,4l.

Er steigt mit etwa 3 m/s auf und erreicht eine Höhe von 10000 m, bevor er platzt.

Wie groß sind die einzelnen Beiträge zu seiner Gesamtenergie (die Ballonhülle wollen wir vernachlässigen)?

- Kinetische Energie: `E_k=m*v^2/2=18*10^-3 J`
- Potenzielle Energie: `E_p=m*g*h=400 J`

- Innere Energie: $U = N \cdot L \cdot 3/2 \cdot k \cdot T = 3/2 \cdot R \cdot T = 1,5 \cdot 8,31 \cdot 273 \text{ J} = 3400 \text{ J}$.

Die innere Energie ist der bei weitem größte Beitrag zur Gesamtenergie.

Arbeit und Wärme

Wie kann sich die Energie eines thermodynamischen Systems ändern?

In der Mechanik haben wir die **Arbeit**, das Produkt Kraft mal Weg, als **Energieübertragung** kennen gelernt. Sie kann sowohl die kinetische als auch die potenzielle Energie eines nicht abgeschlossenen Systems verändern.

Selbstverständlich können wir auch die innere Energie durch Arbeit verändern. Wenn wir etwa einen Fahrradschlauch aufpumpen, dann werden die Pumpe und die Luft in ihr warm, die innere Energie U erhöht sich. Ebenso erwärmen sich die Fahrzeugbremsen durch Reibungsarbeit der Bremsbacken, auch ihre innere Energie U erhöht sich.

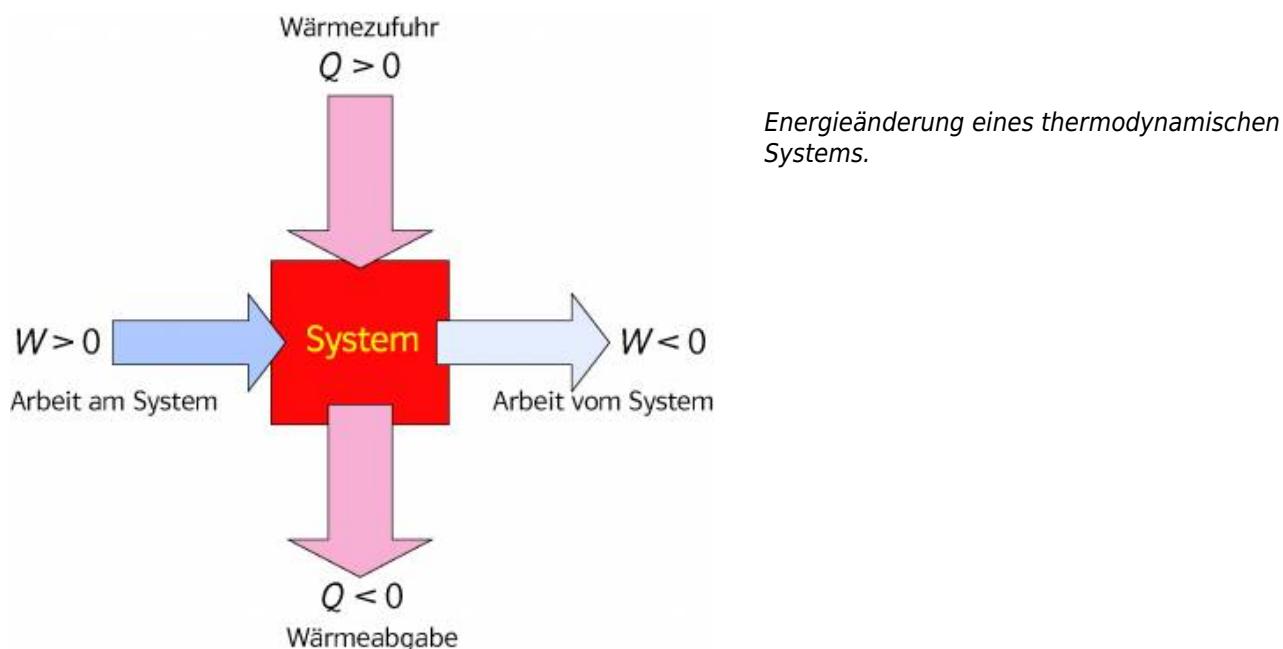
Die innere Energie eines Körpers können wir auch erhöhen, indem wir ihn in Kontakt mit einem heißeren Körper bringen. Es wird dann Wärme $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ übertragen.

Erster Hauptsatz der Wärmelehre

Die innere Energie U eines Körpers kann sowohl durch Arbeit 'W' (z.B. durch Reibung oder Kompressionsarbeit) als auch durch Wärme 'Q' verändert werden. Man fasst dies im so genannten 1. Hauptsatz der Wärmelehre zusammen:

1. Hauptsatz der Wärmelehre

Die innere Energie eines Körpers kann durch Arbeit 'W' und durch Wärme 'Q' geändert werden:
 $\Delta U = W + Q$

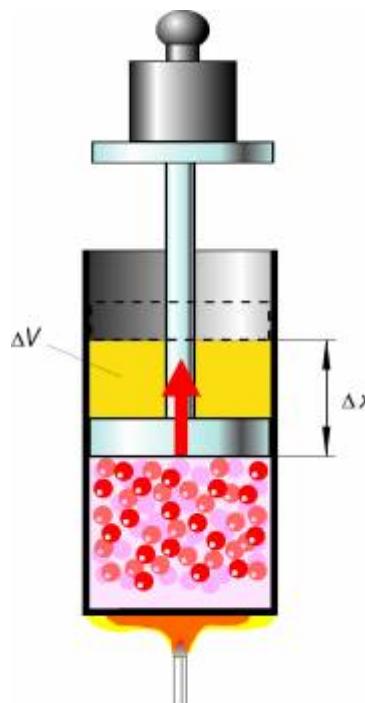


BEM

- Als Vorzeichenregel für den ersten Hauptsatz gilt: Die einem System durch Arbeit oder Wärme zugeführte Energie ist positiv, sie erhöht die innere Energie. Die vom System als Arbeit oder Wärme abgegebene Energie ist negativ, sie vermindert die innere Energie.
- Die innere Energie U ist eine sogenannte Zustandsgröße. Zusammen mit den anderen Zustandsgrößen wie Stoffmenge, Volumen, Druck, Temperatur charakterisiert sie den Zustand eines Körpers als thermodynamisches System.

Nutzung von Wärmeenergie

Wie lässt sich die in einem heißen Gas enthaltene Energie mechanisch nutzen?

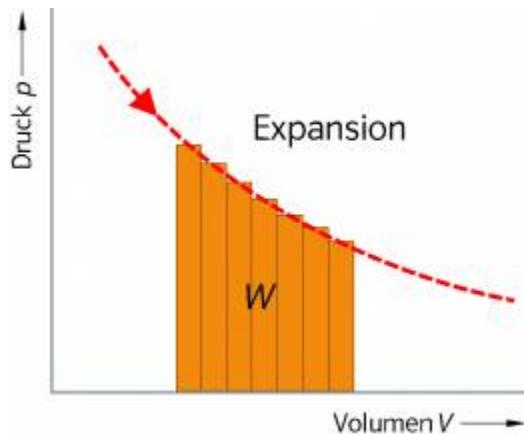


Heißes Gas drückt gegen einen Kolben. Bei Erwärmung erfolgt eine Ausdehnung bei konstantem Druck (isobar). Dadurch wird der Kolben nach außen verschoben und Arbeit verrichtet.

Der Kolben trägt eine Last, wodurch das Gas auf den Druck `p` komprimiert ist. Erwärmt man das Gas, dann dehnt es sich bei konstantem Druck aus. Der bewegliche Kolben soll sich dabei um die Strecke `Δx` verschieben. Bezeichnet `A` die Kolbenfläche, so ist die Kraft auf den Kolben durch `F=p*A` gegeben. Die bei der Volumenausdehnung des Gases (Expansion) verrichtete Arbeit W ist das Produkt Kraft mal Weg, also

$$W = -F \cdot \Delta x = -p \cdot A \cdot \Delta x = -p \cdot \Delta V \quad \dots \text{Expansionsarbeit}$$

wobei `ΔV=A*Δx` die Volumenzunahme des Gases ist. Das Vorzeichen der Arbeit ist negativ, da dem System Energie entzogen wird.



Die Arbeit ' $W = -p \cdot \Delta V$ ' ist durch die Fläche aller Rechtecke unter dem Graphen ' $p(V)$ ' gegeben. In diesem Beispiel nimmt der Druck im Zylinder während der Expansion allmählich ab.

Umkehrung: Verkleinert sich dagegen das Volumen des Gases (Kompression), so wird von außen Arbeit am Gas verrichtet.

' $\Delta W = -p \cdot \Delta V > 0$ ', wegen ' $\Delta V < 0$ '. Dazu als Beispiel die Fahrradpumpe. Meist stößt man den Kolben der Pumpe rasch - so schnell, dass keine Zeit zum Temperaturausgleich der Pumpe mit der Umgebung bleibt, die gesamte an der Luft in der Pumpe verrichtete Arbeit wird als innere Energie in der Luft gespeichert: ' $\Delta U = W$ ' (adiabatische Zustandsänderung)

Verbrennungsprozesse

Was versteht man unter dem Heizwert?

Bei der Verbrennung von Stoffen nimmt die innere Energie des Systems „Brennstoff + Sauerstoff“ durch die chemische Reaktion ab. Die Energiedifferenz wird als Wärme (und Licht) an die Umwelt abgegeben. Die Energiemengen variieren dabei je nach Substanz, die verbrannt wird. Zur Charakterisierung von Brennstoffen definiert man daher die materialabhängige Größe Heizwert:

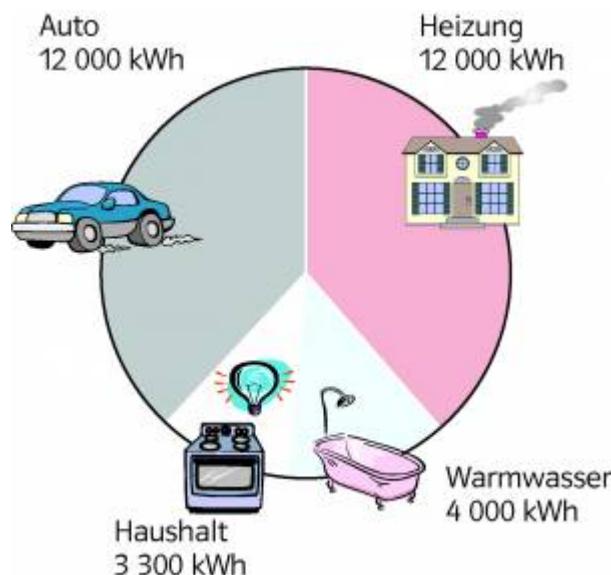
Der **Heizwert** gibt an, **wie viel Energie** bei der **Verbrennung von 1 kg einer Substanz** an die Umgebung abgegeben wird.

Holz	14
Braunkohle	22–25
Steinkohle	25–29
Benzin	40
Diesel, Heizöl	42
Erdgas	50

Heizwert einiger Brennstoffe in MJ/kg

Praktisch alle Brennstoffe neben reiner Kohle bestehen aus Kohlenwasserstoffen. Bei ihrer Verbrennung entsteht neben ' CO_2 ' auch ' H_2O ', das als Dampf im Verbrennungsgas enthalten ist. Er wird als Nebel über Schornsteinen, am KFZ-Auspuff und als Kondensstreifen bei Flugzeugen sichtbar. Besonders bei Erdgasheizungen ist es sinnvoll, die im Wasserdampf enthaltene Wärme zu nützen. Die wichtigsten Energieträger für private Haushalte in Österreich sind derzeit (2010) für

- Heizung: Holz (ca. 30%), Erdgas (25%), Heizöl (25%), Fernwärme (12%)
- Warmwasser: Strom (27%), Erdgas (23%), Holz, Öl und Fernwärme



Heizung und Auto verbrauchen im Durchschnitt am meisten Energie in privaten Haushalten.

EX Nährwerte von Lebensmitteln

Auch die Nährwerte unserer Nahrungsmittel können als Heizwerte verstanden werden. Was hat Nahrung mit Verbrennung zu tun?

Über die Nahrungsmittel nehmen wir z.B. Kohlenhydrate auf. Diese werden bei der Verdauung in Traubenzucker umgewandelt, der vom Blut zur Muskulatur und zum Gehirn transportiert wird. Der Traubenzucker dient als „Brennstoff“, und wird mit Hilfe des Blutsauerstoffs (aus der Lunge) zu Kohlenstoffdioxid oxidiert. Dabei wird Energie in Form von Wärme und Muskelarbeit frei. Das Kohlenstoffdioxid atmen wir über die Lunge wieder aus.

Alter	männlich	weiblich
15 bis 19 Jahre	13 000 kJ	10 500 kJ
19 bis 25 Jahre	12 500 kJ	10 000 kJ
25 bis 51 Jahre	12 100 kJ	9 600 kJ
51 bis 65 Jahre	10 500 kJ	8 400 kJ
über 65 Jahre	9 600 kJ	7 500 kJ

Empfohlene Richtwerte für eine ausgewogene Energiezufuhr pro Tag für Personen mit einer leichten körperlichen Tätigkeit

100 g Speck	3 550
100 g Frankfurter	1 050
100 g Rindfleisch	500
100 g Scholle (Fisch)	350
1 Hähnerei	300
100 g Vollkornbrot	950
100 g Butter	3 150
100 g Fettkäse	1 675
100 g Zucker	1 675
1 Apfel	300
100 g Reis	1 550
100 g Kartoffeln	300
100 g Spinat	75
1 l Vollmilch	3 750
100 g Schokolade	2 300

Die über die Oxidation eines Nahrungsmittels im Körper frei werdende Energie wird in den „Nährwerttabellen“ (früher „Kalorientabellen“) angegeben. Zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur und für die lebenswichtigen Körperfunktionen werden ungefähr 100 kJ Energie pro kg Körpergewicht und pro Tag benötigt. Diese Energiemenge bezeichnet man als den Grundumsatz. Der Grundumsatz ist nicht für alle Menschen gleich, er hängt u. a. vom Geschlecht und vom Alter und von der hormonellen Konstitution ab. Ein weiterer Energieumsatz (Leistungsumsatz) wird für die Tätigkeit der Muskeln bei Arbeit und Sport, für das Wachstum, für erhöhten Wärmebedarf in kalter Umgebung und für geistige Tätigkeit benötigt.

From:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - **Wiki**



Permanent link:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:wl:energie>

Last update: **2018/02/26 07:30**

Entropie

Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre

Eine Besonderheit thermodynamischer Vorgänge

Thermodynamische Vorgänge Fast selbstverständlich und dennoch höchst bemerkenswert ist folgender Sachverhalt: Nie wurde beobachtet, dass sich kaltes Wasser in einem Topf weiter abkühlt und Wärme an die heiße Herdplatte abgibt. Niemals beginnt das Wasser in einer Teetasse zu sieden, während sich die Zimmerluft abkühlt. Im Gegenteil! Der selbständige Wärmeübergang führt immer zu einem Temperaturausgleich und nie zu einer Verstärkung der Temperaturunterschiede.

M 2. Hauptsatz der Wärmelehre

Diese Erfahrung hat der deutsche Physiker Rudolf Clausius (1822-1888) in einem weiteren Hauptsatz der Wärmelehre formuliert:



Rudolf Clausius (1822-1888), stellte im Jahre 1850 den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre auf und zog daraus wichtige Schlussfolgerungen über Wärmekraftmaschinen. Im Jahre 1865 führte er den Entropiebegriff ein.

Wärme geht von selbst nur von einem wärmeren auf einen kälteren Körper über und niemals umgekehrt.

BEM Richtung der Zeit

Dieser Satz ist deshalb wichtig, weil er eine eindeutige Richtung der Naturvorgänge festlegt. Der erste Hauptsatz (Satz von der Energieerhaltung) würde auch den umgekehrten Vorgang zulassen.

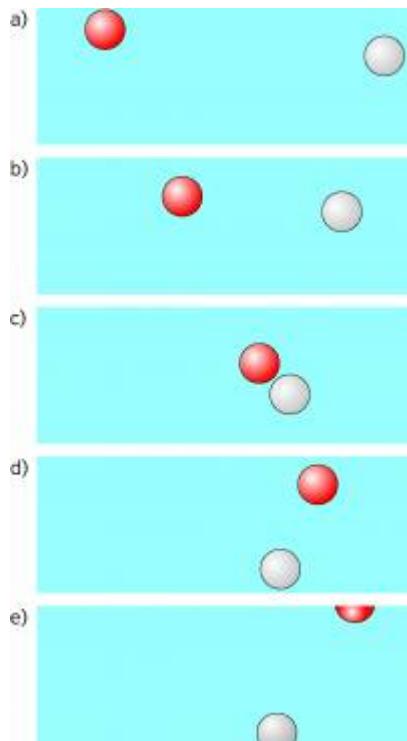
Eine Anmerkung: Der 2. Hauptsatz verallgemeinert eine wiederholt gemachte Erfahrung, nämlich dass ein bestimmter Vorgang noch nie beobachtet wurde. Daraus wird behauptet, dass der Vorgang auch künftig nicht erfolgen kann. Der Schluss ist nach den Gesetzen der Logik nicht zulässig: Wer noch nie schwarze Schwäne gesehen hat, könnte meinen, dass es sie nicht gibt - sie sind jedoch in Australien heimisch. Boltzmanns statistische Thermodynamik lieferte die Rechtfertigung für den 2. Hauptsatz: Wegen der ungeheuer großen Teilchenzahl in thermodynamischen Systemen ist es zwar nicht

ausgeschlossen, aber extrem unwahrscheinlich, dass der nichtbeobachtete Vorgang jemals eintritt.

Irreversible Vorgänge - Entropieänderung

Reversible Vorgänge

Reibungsfreien Vorgänge können (gemäß der Newton'schen Mechanik) ebenso gut in der einen wie in der anderen Richtung ablaufen können. Die Bilderreihe zeigt den Zusammenstoß zweier Kugeln. Ohne zusätzliche Information kann man nicht feststellen, ob der Vorgang in der Reihenfolge a bis e oder umgekehrt abläuft. Auch die Folge e bis a beschreibt einen physikalisch möglichen Vorgang. Wir sprechen daher von einem umkehrbaren oder reversiblen Vorgang.



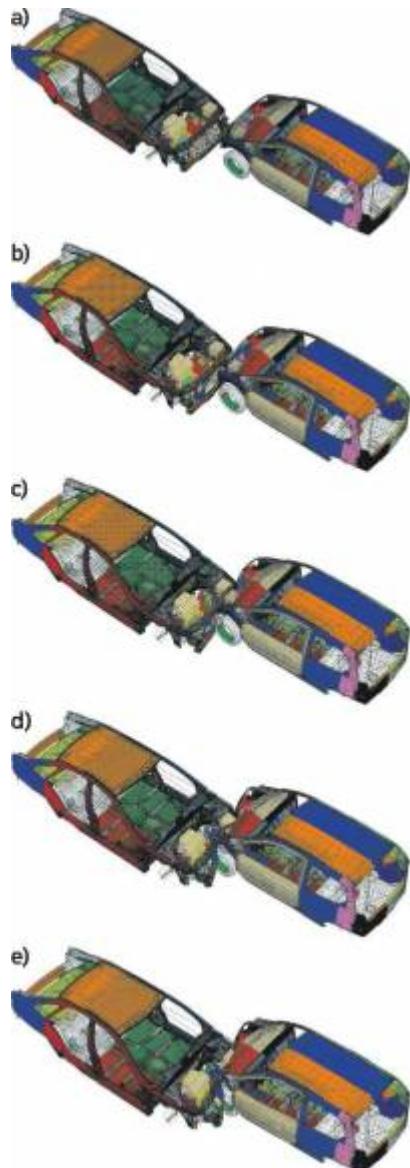
Elastischer Stoß.

Reihenfolge von a nach e oder umgekehrt von e nach a?

*Das lässt sich hier nicht sagen. Beide Reihenfolgen wären möglich.
Der Vorgang ist umkehrbar (reversibel).*

Irreversible Vorgänge

Dagegen kann man die Bilder vom Zusammenstoß zweier Autos sofort richtig ordnen. Der natürliche Ablauf des Vorgangs lautet: Bewegung, Aufprall, Deformation, Stillstand. Beim zeitlich umgekehrten Vorgang würden die deformierten und ruhenden Autos sich von selbst reparieren und dabei nach rückwärts aus einander fahren. Wenn ein Film des Aufpralls umgekehrt vorgeführt wird, merkt man sofort, dass ein solcher Vorgang in Wirklichkeit niemals vorkommt. Was hat dies mit Wärmelehre zu tun? Beim Aufprall des Autos wird dessen gesamte kinetische Energie in ungeordnete Molekularbewegung umgewandelt und dabei das Auto verformt und erwärmt. Beim zeitlich umgekehrten Vorgang müsste sich das Fahrzeug von selbst abkühlen und gleichzeitig die Energie der ungeordneten thermischen Bewegung teils zur Wiederherstellung der Struktur des Autos nutzen, teils in die geordnete Bewegung des gesamten Autos überführen. Nach den Gesetzen der Newton'schen Mechanik wäre dies nicht unmöglich, nach Boltzmanns Thermodynamik aber extrem unwahrscheinlich. Die Selbstreparatur des Schrottautos widerspricht dem zweiten Hauptsatz. Wir haben es daher mit einem nicht umkehrbaren oder irreversiblen Vorgang zu tun.



Bei einem Crash-Test ist die Reihenfolge eindeutig: a-e. Der Vorgang ist nicht umkehrbar - er ist irreversibel.

Wenn ein Vorgang von selbst nur in einer Richtung ablaufen kann, bezeichnet man ihn als **irreversibel**. Der 2. Hauptsatz bestimmt die Richtung von irreversiblen Prozessen.

EX Diffusionsvorgang



Ein Tropfen Tinte diffundiert im Wasser. Nach einiger Zeit ist das Wasser einheitlich gefärbt. Die Entropie hat zugenommen, der Prozess ist irreversibel.

F Gib Beispiele für reversibel und für irreversible Vorgänge an!

Reversible Vorgänge sind z.B. ungedämpfte Pendelschwingungen oder elastische Stöße. Sie kommen in der Natur wegen der unvermeidlichen Reibung niemals vor.

Im Alltag beobachtet man irreversible Prozesse: Gedämpfte Pendelschwingungen, unelastische Stöße, Erwärmung durch Reibung, Diffusion, Wärmeleitung, Deformationen usw. Fensterscheiben können beim Ballspiel zwar zerbrechen, aber sie haben sich noch nie von selbst repariert!

F Wie unterscheiden sich reversible und irreversible Vorgänge?

Was ist Entropie

LF Stehen irreversible Vorgänge zum 1. Hauptsatz in Widerspruch?

In einem abgeschlossenen System lässt sich aus Energieänderungen keine Richtung für thermische Prozesse ablesen.

Die Richtung wird durch die Änderung einer anderen Zustandsgröße charakterisiert, nämlich durch die Änderung der **Entropie**.

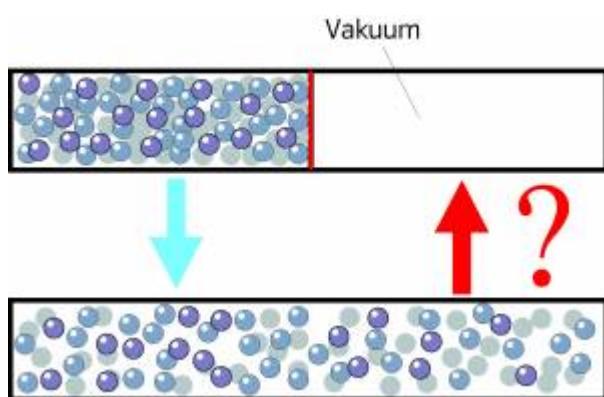
M Entropie

Die Entropie 'S' ist eine **Zustandsgröße**, sie hängt nur vom aktuellen Zustand des abgeschlossenen thermischen Systems ab.

Findet in einem abgeschlossenen System ein **irreversibler Prozess** statt, so nimmt die Entropie 'S' dieses Systems zu: ' $\Delta S > 0$ '

Bei **reversiblen Prozessen** bleibt die Entropie gleich: ' $\Delta S = 0$ '.

Die gesamte Entropie eines Systems kann nicht abnehmen.



Ein Gas befindet sich in der linken Hälfte eines Behälters. Die Zwischenwand wird entfernt. Das Gas expandiert ins Vakuum. Sollte die Molekularbewegung, die das Gas ausströmen lässt, nicht auch eine Umkehr dieses Vorganges bewirken können? Z.B. wenn alle Teilchen an der rechten Wand reflektiert werden?

EX Entropieänderung bei Wärmeübergang

Wenn sich in einem thermodynamischen Prozess der Zustand des Systems ändert, ändert sich meist auch die Entropie des Systems.

Die Änderung der Entropie eines Systems beträgt ` $\Delta S = Q/T$ `.

`Q` ist die übertragene Wärme, `T` die entsprechende Temperatur

Das neu geschaffene Wort Entropie ist dem Wort Energie nachempfunden. Energie weist auf die im System steckende Arbeitsfähigkeit (ergon, griechisch Arbeit) hin, Entropie auf die Umwandlungsfähigkeit.

Wir betrachten ein System, das aus einem wärmeren Körper (Temperatur `T_1`) und einem kälteren Körper (`T_2`) besteht, und berechnen die Entropieänderung des Systems beim Übergang von Wärme `Q` vom wärmeren auf den kälteren Körper (`T_2`). Wenn ein Körper bei der Temperatur `T` die Wärmemenge `Q` aufnimmt, dann steigt seine Entropie um `ΔS = Q/T`. Bei Wärmeabgabe nimmt die Entropie des Körpers ab. Die gesamte Entropieänderung beträgt daher

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -Q/T_1 + Q/T_2 = (Q*(T_1-T_2))/(T_1*T_2).$$

Wegen `T_1 > T_2` ist also `ΔS > 0`. Die Entropie des Gesamtsystems nimmt zu, wenn Wärme von einem wärmeren auf einen kälteren Körper übergeht.

Für die Entropie `S` gilt im Unterschied zur Energie kein Erhaltungssatz. Während die Gesamtenergie in einem abgeschlossenen System erhalten bleibt, nimmt die Gesamtentropie bei irreversiblen Vorgängen (also bei praktisch allen natürlich ablaufenden Prozessen) zu. Dabei wird wie beim Energiesatz vorausgesetzt, dass das System abgeschlossen ist.

BEM Wärmетод - realistische Entwicklung oder nicht?

Mit der **Entropiezunahme** ist eine **zeitliche Entwicklung des Gesamtsystems** verbunden. Im Beispiel gab es anfangs, d.h. in der Vergangenheit, Temperaturunterschiede im System, die sich in der Zukunft ausgleichen. `ΔS > 0` bestimmt die Richtung, in der irreversible Prozesse ablaufen, das System altert - die Zeit verstreicht! Wenn das Temperaturliegengewicht erreicht ist, gilt `ΔS = 0`, und das System ändert sich nicht mehr, die Zeit ist stehen geblieben.

Rudolf Clausius, der die Welt noch als abgeschlossenes System ansah, hat die Folgerungen aus dem 1. und dem 2. Hauptsatz folgendermaßen ausgedrückt:

Die Energie der Welt ist konstant, die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Am Ende des 19. Jhs. hat man diese Argumente auf das Universum angewendet und man kam zu einer schockierenden Einsicht: Im Lauf der Zeit sollten sich die Temperaturunterschiede ausgleichen, in einem gleichmäßig warmen Universum würden alle Veränderungsprozesse zum Stillstand kommen. Man sprach vom **Wärmетод des Universums** - auch wenn dieser erst in ferner Zukunft eintreten sollte. Aus heutiger Sicht ist es allerdings ungewiss, ob das Universum ein abgeschlossenes System ist oder Teil eines größeren Systems ist - trotz aller Fortschritte der Physik enthält die Kosmologie noch viele Rätsel.

Statistische Betrachtung der Entropie

EXP Ein Gedankenexperiment

Ein Mol eines idealen Gases, also $n=N_L=6 \cdot 10^{23}$ Moleküle, befindet sich in der linken Hälfte eines durch eine Wand geteilten Behälters. Entfernt man die Wand, so verteilen sich die Gasteilchen gleichmäßig auf das gesamte Volumen, sie sind in ständiger Bewegung. Der Vorgang ist irreversibel. Niemand hat je beobachtet, dass sich das Gas von selbst wieder in eine Behälterhälfte zurückzieht. Aber ist dies prinzipiell unmöglich? Eine einfache Überlegung hilft dies zu klären.

- (1) Ist im Behälter nur ein Teilchen vorhanden ($n=1$), so ist es mit jeweils gleicher Wahrscheinlichkeit $P_1 = 0,5$ links wie rechts anzutreffen.



- (2) Fügen wir ein zweites Teilchen hinzu. Auch dieses wird sich mit der Wahrscheinlichkeit $P_2=0,5$ links befinden. Die Wahrscheinlichkeit, beide Teilchen gleichzeitig links zu finden, ist $P=P_1 \cdot P_2 = 0,25$. Im Mittel finden wir diese Situation bei jeder vierten Beobachtung.



- (3) Jedes weitere Teilchen halbiert die Wahrscheinlichkeit, alle Teilchen links zu finden, so dass wir bei n Teilchen durchschnittlich $2n$ -mal beobachten müssen, bis wir alle Teilchen eines Mol Gas einmal links vorfinden.



Bei 10 Teilchen müsste man im Mittel $2^{10}=1024$ Beobachtungen machen und dies würde bei einer Beobachtung pro Sekunde etwa eine Viertelstunde dauern. Aber bereits bei 100 Teilchen wären durchschnittlich $2^{100} = (1024)^{10} = \text{ca. } 10^{30}$ Beobachtungen nötig.

Wie viele Jahre brauchte man dafür? Für $n=N_L=6 \cdot 10^{23}$ ist 2^n viel größer als jede vorstellbare Zahl! Es ist also **extrem unwahrscheinlich**, dass ausgestromtes Gas sich durch Zufall jemals wieder sammelt.

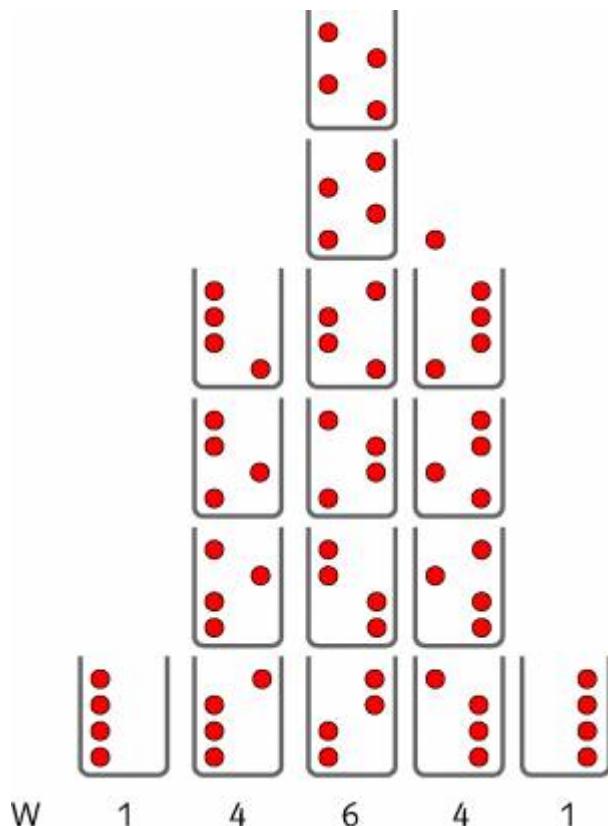
Statistik spricht gegen Umkehr und Wiederkehr

Die von selbst eintretende Umkehr irreversibler Vorgänge ist **nicht prinzipiell unmöglich**, aber **statistisch gesehen extrem unwahrscheinlich**.

Entropie und Wahrscheinlichkeit

Führen wir das obige Gedankenexperiment weiter und zählen wir die Möglichkeiten ab, eine Anzahl Teilchen auf links und rechts zu verteilen.

Wahrscheinlichkeitsverteilung bei 4 Teilchen:



Es gibt 16 Möglichkeiten, vier verschiedene Teilchen in einem Behälter links und rechts zu verteilen. Nur eine Möglichkeit aus 16 stellt den Ausgangszustand dar. Die Verteilung 2:2 ist mit $P=6/16=3/8$ die wahrscheinlichste.

Dadurch finden wir die relativen Wahrscheinlichkeiten. Es gibt 6 Möglichkeiten, gleich viele Teilchen links und rechts zu platzieren, aber nur 1 Möglichkeit, alle Teilchen links zu platzieren. Bei 4 Teilchen ist daher die Gleichverteilung bereits 6-mal häufiger bzw. wahrscheinlicher als die Ausgangsverteilung, bei 6 Teilchen bereits 20-mal, bei 8 Teilchen 70-mal, u.s.w. Damit wird verständlich, dass beträchtliche Abweichungen von der Gleichverteilung extrem unwahrscheinlich sind.

Die Anzahl W der Möglichkeiten für eine bestimmte Aufteilung der Teilchen auf links und rechts bestimmt die relative Wahrscheinlichkeit dieser Aufteilung. Allgemein gilt: Von selbst ablaufende Prozesse verlaufen stets so, dass die Entropie maximal wird. Die statistische Betrachtung zeigt, dass ein sich selbst überlassenes thermodynamisches System den wahrscheinlichsten Zustand (W maximal) anstrebt und nur kleine Schwankungen um diesen wahrscheinlichsten Zustand auftreten, große Schwankungen aber sehr unwahrscheinlich sind.

Dies legt nahe, dass zwischen der Entropie eines Zustands und der Wahrscheinlichkeit eines Zustands ein Zusammenhang besteht. Den Zusammenhang hat [Ludwig Boltzmann](#) gefunden. Wegen ihrer Bedeutung befindet sich diese Beziehung sogar als Inschrift auf seinem Grabmal in Wien:



Boltzmanns Grabmal am Wiener Zentralfriedhof

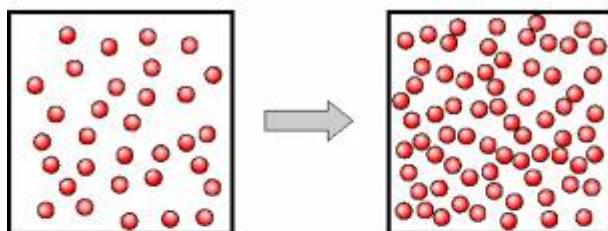
Entropiedefinition nach Boltzmann `S = k*\ln W`

Die Boltzmann-Konstante `k=1,38*10^{-23}` J/K wurde bereits im Zusammenhang mit der mittleren kinetischen Energie der Teilchen eines idealen Gases eingeführt. `W` ist die Anzahl der Möglichkeiten, einen speziellen thermodynamischen Zustand eines Systems durch seine Teilchen zu realisieren.

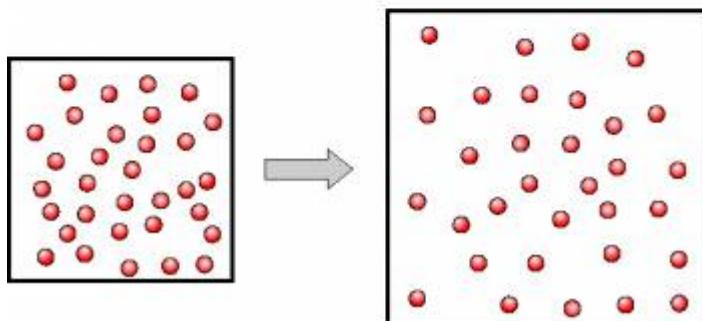
`W=1` gilt z.B. am - nicht erreichbaren - absoluten Nullpunkt, weil es dort nur einen einzigen Zustand gibt: Die Moleküle bewegen sich nicht. Die Entropie ist null, weil dann `ln 1 = 0` ist.

BEM Entropie und Information

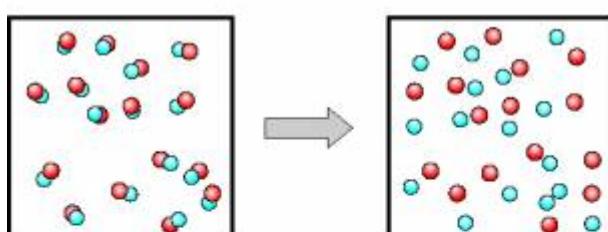
Information geht verloren, wenn:



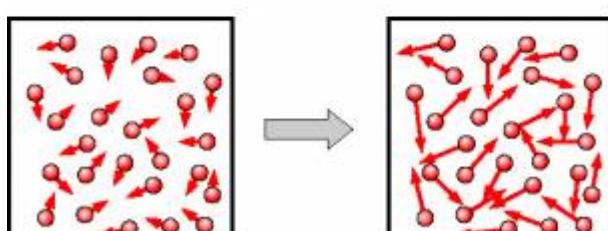
sich die Zahl der Teilchen erhöht,



sich das Volumen vergrößert,



sich Moleküle in Ionen zerlegen,



sich die Geschwindigkeit der Moleküle erhöht.

Entropie und Information:

Ein Informationsverlust bedeutet eine Zunahme der Entropie (und umgekehrt). Bei den dargestellten Vorgängen geht Information z.B. über den Ort der Teilchen verloren, da ihnen nachher mehr Raum zur Verfügung steht.

F Kann in einem Teil eines Systems die Entropie abnehmen?

From:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - **Wiki**



Permanent link:
<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:wl:entropie>

Last update: **2016/05/08 18:54**