

I. Der Zweck des Dampfkessels.

Der Zweck jeder Dampfkesselanlage ist die Umsetzung des in den Brennstoffen enthaltenen chemischen Arbeitsvermögens in Wärme dergestalt, daß dieselbe an einem anderen nahe gelegenen Orte verwendet werden kann, und zwar entweder, nach einer weiteren Umwandlung, in Form von mechanischer Arbeit oder direkt als Wärme zum Heizen und Kochen.

Der wirtschaftliche Wirkungsgrad einer Kesselanlage ist nun verschieden zu bewerten, je nachdem nur die erste, die zweite oder nacheinander auch beide Verwendungsarten des Dampfes in Betracht kommen.

Es ist bekannt, daß die Dampfkraftanlagen die ihnen zur Verfügung gestellten Energiemengen verhältnismäßig schlecht ausnutzen und daß die Schuld daran, oft zu Unrecht, dem Dampfkessel zugeschrieben wird. Man rechnet bei Dampfkraftanlagen, selbst bei vorzüglicher Einrichtung, nur mit einem wirtschaftlichen Wirkungsgrade $\eta_w = 0,12$ bis $0,15$. Das Bild ändert sich aber, wenn man sich nicht darauf beschränkt, nur Arbeit zu gewinnen, sondern wenn hinterher auch noch die gelieferte Wärme als solche verwendet wird.

Alsdann ist es möglich, wie Untersuchungen gezeigt haben, über 70 v. H. der Energie des Brennstoffes auszunutzen.

Allerdings ist zuzugeben, daß die Energie in Form von mechanischer Arbeit, eben weil sie schwieriger zu gewinnen ist, einen höheren wirtschaftlichen Wert hat als in Form von Wärme.

Der Technik der Wärmekraftmaschinen dürfte aber der Weg gewiesen sein, die sehr bedeutenden Wärmemengen, welche auch mit den vollkommensten maschinellen Einrichtungen nicht mehr in mechanische Arbeit verwandelt werden können, zu Heizzwecken nutzbar zu machen.

Gelegenheiten dazu lassen sich durch organisatorische Maßnahmen, wie die Vereinigung von kraftzeugenden und wärmeverbrauchenden Anlagen, z. B. in städtischen Betrieben, bei Kraftwerken in Verbindung mit Badeanstalten und Heizungsanlagen, vielerorts schaffen.

Versuche nach dieser Richtung haben bereits die günstigsten wirtschaftlichen Erfolge gehabt.

II. Die Wärme.

Die Wärme ist eine der Formen, in denen das in der Natur vorhandene Arbeitsvermögen (Energie) auftritt; sie wird durch das Gefühl wahrgenommen und in der Regel durch die Ausdehnung der Körper, denen sie zugeführt wird, gemessen. Die technische Wärmelehre oder Thermodynamik fußt in erster Linie auf den Forschungen von Sadi Carnot, Robert Mayer und Clausius. Die Ergebnisse derselben seien kurz durch folgende Sätze umschrieben:

1. Wärme und mechanische Arbeit sind gleichwertig (äquivalent).

2. Die Wärme ist kein Stoff, sondern sie ist die Bewegungsenergie der Moleküle. Wärme geht nur von einem wärmeren zu einem kälteren Körper, aber nie von selbst den umgekehrten Weg.

3. Wärme kann nur dann in mechanische Arbeit verwandelt werden, wenn zwei Körper von verschiedener Temperatur vorhanden sind. Der thermische Wirkungsgrad ist um so höher, je größer dieser Temperaturunterschied ist.

1. Temperatur.

Die Temperatur bezeichnet den Wärmezustand, in welchem sich ein Körper befindet, d. h. den Grad der Bewegungsenergie seiner Moleküle.

In der Technik mißt man die Temperatur nach der Skala von Celsius, deren Nullpunkt bei der Temperatur des schmelzenden Wassers liegt und deren Einheit dadurch bestimmt ist, daß man den Temperaturunterschied zwischen der Temperatur des bei 760 mm Q. S. siedenden Wassers und diesem Nullpunkt in 100 gleiche Teile teilt. Die Bezeichnung dafür ist $t^\circ \text{C}$.

Daneben benutzt man die absolute Skala, deren Nullpunkt 273° unter 0°C liegt, Bezeichnung T° . Nach der Hypothese von der Molekularbewegung würde ein Körper bei dieser Temperatur überhaupt keine Wärme haben und seine Moleküle sich vollständig bewegungslos verhalten.

2. Ausdehnung.

Mit ganz geringen Ausnahmen dehnen sich alle Körper bei der Erwärmung aus. Die Ausdehnungszahl gibt die Zunahme an, welche die Längeneinheit bei festen Körpern oder die Raumeinheit bei festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern bei 1° Temperaturerhöhung erfährt.

Bezeichnen β die lineare Ausdehnungszahl, l_0 die Länge, V_0 den Rauminhalt eines Körpers bei $t_0^\circ \text{C}$ und l_1 die Länge, V_1 den Rauminhalt eines Körpers bei $t_1^\circ \text{C}$, so ist

$$l_1 = l_0 [1 + \beta (t_1 - t_0)],$$

und die Verlängerung eines Stabes von der Länge l bei der Temperaturerhöhung $t = t_1 - t_0$ ist

$$\Delta l = \beta l t.$$

Die Raumausdehnung läßt sich aus der linearen Ausdehnung ohne weiteres berechnen. Mit genügender Annäherung rechnet man jedoch mit einer Raumausdehnungszahl gleich der dreifachen Längenausdehnungszahl, also ist die Raumausdehnung

$$\Delta V = \alpha V \cdot t,$$

worin $\alpha = 3\beta$ und

$$V_1 = V_0 [1 + \alpha (t_1 - t_0)].$$

Mittlere Ausdehnungszahlen einiger Stoffe:

Blei	$\beta = 1/35100$
Kupfer	$\beta = 1/60900$
Bronze	$\beta = 1/57000$
Flußeisen	$\beta = 1/85000$
Schweißeisen	$\beta = 1/82500$
Gußeisen	$\beta = 1/93700$
gewöhnliche Ziegelsteine	$\beta = 1/180000$
feuerfeste „	$\beta = 1/200000$
bleifreies Glas	$\beta = 1/114000$

Feuerfestes Mauerwerk nimmt beispielsweise bei einer

Temperaturerhöhung von 500°C um $500 \cdot \frac{1000}{200000} = 2\frac{1}{2}$ mm auf 1 m an Länge zu.

Bei hohen Temperaturen ändert sich die Ausdehnungszahl, und zwar nimmt sie im allgemeinen zu.

Flüssige Körper haben nur Raumausdehnung; dieselbe ist weniger gleichförmig als die der festen Körper, besonders in der Nähe der Siedetemperatur.

Für Quecksilber ist $\alpha = 1/5509$.

Das Wasser hat seinen kleinsten Rauminhalt bei $+4^\circ\text{C}$, derselbe nimmt bei Abkühlung auf 0° um 0,013 v. H. bei Erwärmung auf 100°C um 4,34 v. H. zu.

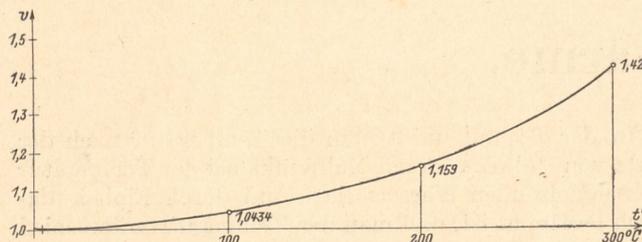


Fig. 1. Temperaturvolumenkurve des Wassers.

Gasförmige Körper haben alle ungefähr die gleiche

Ausdehnungszahl $\alpha = \frac{1}{273} = 0,003665$.

3. Wärmeeinheit.

Trotzdem die Wärme kein Stoff ist, spricht man von Wärmemengen. Die Einheit der Wärmemenge, Wärmeeinheit, WE, auch Calorie genannt, ist diejenige Wärmemenge, welche die Temperatur von 1 kg Wasser von 0°C auf 1°C zu erhöhen vermag.

4. Spezifische Wärme.

Die spez. Wärme c eines Stoffes gibt die Zahl von Wärmeeinheiten an, die erforderlich sind, um die Temperatur von 1 kg dieses Stoffes um 1°C zu erhöhen.

Die spez. Wärme ist im allgemeinen eine mit der Temperatur veränderliche Größe; man rechnet aber mit mittleren Werten, welche für die Temperaturen von 0° bis 100° wenig von den genauen Werten abweichen.

Es ist für

Blei	$c = 0,031$
Kupfer	$c = 0,094$
Eisen und Stahl	$c = 0,115$
Steinkohle	$c = 0,31$
Ziegelsteine	$c = 0,22$
Glas	$c = 0,20$
Eichenholz	$c = 0,57$
Eis	$c = 0,50$

Die spez. Wärme des Wassers stellt man in der Regel mit $c = 1$ in Rechnung. In Wirklichkeit ist c bei 35° um 0,29 v. H. kleiner, bei 100° um 0,43 v. H. größer als 1.

Der Mittelwert zwischen:

0° und 100°C ist jedoch wieder	$c_m = 1,00$
0° „ 200°C „	$c_m = 1,0155$
0° „ 300°C „	$c_m = 1,0449$

Bei den Gasen unterscheidet man: die spez. Wärme bei konstantem Rauminhalt c_v und die spez. Wärme bei konstantem Druck c_p .

Die Werte c_v der verschiedenen Gase verhalten sich umgekehrt wie die spez. Gewichte derselben.

c_p ist immer größer als c_v , weil die Erwärmung bei konstantem Druck wegen der Raumvergrößerung mit einer äußeren Arbeit verbunden ist, die zu der inneren Arbeit hinzutritt.

Beide spez. Wärmen sind abhängig von der Temperatur.

Zahlentafel Nr. 1.

Spezifische Wärme bezogen auf 1 kg, bei 15°C .)

	c_v	c_p
Wasserstoff	2,443	3,431
Sauerstoff	0,154	0,216
Stickstoff	0,176	0,247
Kohlenoxyd	0,176	0,248
Atmosphärische Luft	0,170	0,239
Kohlensäure	0,179	0,224
Wasserdampf	$\sim 0,33$	$\sim 0,48$

Bei Wasserdampf kommt noch die Abhängigkeit von dem Druck in Betracht, jedoch erheblich nur in der Nähe des Sättigungszustandes. Dort schwankt der Wert von c_p zwischen 0,45 und 0,75, während er von etwa 400°C an durch die Gleichung

$$c_p = 0,372 + 0,000\ 238\ T \quad (1)$$

bestimmt ist.

Für technische Rechnungen hat man bisher allgemein den konstanten Wert $c_p = 0,48$ benutzt; doch haben neuere Versuche erwiesen, daß dieser Wert zu gering ist.

Für angenäherte Berechnungen empfiehlt es sich, $c_p = 0,54$ zu nehmen, welcher Wert den tatsächlichen Verhältnissen besser entspricht als $c_p = 0,48$. Weiteres ist im Abschnitt VIII enthalten.

Die spez. Wärme von Gasgemengen kann aus den Gewichtsteilen und den spez. Wärmen der Einzelgase berechnet werden. Von solchen Gasgemengen kommen hier die Feuergase bei der Verbrennung von Steinkohlen in Betracht, für welche bei durchschnittlicher Zusammensetzung

$$c_p = 0,236 + 0,000\ 055\ T \quad (2)$$

ist.

¹⁾ W. Schüle, Technische Wärmemechanik, Berlin 1909.

5. Das Wärmediagramm.

Allgemein betrachtet, kann eine einem Körper zugeführte Wärmemenge dQ dreierlei Wirkungen ausüben und demnach in drei Wärmeanteile zerlegt werden.

1. dW , Wärmeanteil, der zur Vermehrung der Schwingungsarbeit der Moleküle dient und sich durch Temperaturerhöhung bemerkbar macht, fühlbare Wärme.

2. dJ , Wärmeanteil, welcher eine Änderung des Aggregatzustandes bewirkt, latente Wärme.

3. $dL = A p dv$, Wärmeanteil, welcher gegen einen äußeren Druck eine Raumvergrößerung durchsetzt, äußere Arbeit.

Man faßt dW und dJ auch unter der Bezeichnung innere Arbeit zusammen im Gegensatz zur äußeren Arbeit.

A bedeutet das Verhältnis, nach welchem Wärme in Arbeit umgesetzt wird. $A = \frac{1}{427}$; d. h.

$$1 \text{ WE} = 427 \text{ m/kg.}$$

p ist der Druck, gegen welchen die Raumänderung dv erfolgt, so daß $p dv$ in m/kg, $A p dv$ in WE gemessen wird.

Die Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit legt es nahe, wie es üblich ist, die Arbeit im Druck-Volumen- oder Kraft-Weg-Diagramm bildlich darzustellen, auch die Wärme in ähnlicher Weise zu behandeln. In einer häufig verwendeten Darstellungsart werden die Wärmeeinheiten als Abszissen, die Temperaturen als Ordinaten aufgetragen. Wenn auch diese Darstellung in vielen Fällen eine gute Übersicht bietet, so ist es doch mit Rücksicht auf die obenerwähnte Analogie folgerichtiger und führt zu besserer Einsicht, die Wärme nicht als Strecke, sondern als Fläche darzustellen, und das geschieht in dem sog. Wärme- oder Temperatur-Entropie-Diagramm. Eine gewisse Schwierigkeit gegenüber dem Arbeitsdiagramm liegt darin, daß, während bei dem letzteren die Faktoren Kraft und Weg des Produktes Arbeit ohne weiteres verständlich sind, dies mit dem Begriffe Entropie nicht in demselben Maße der Fall ist.

Als einfache Erklärung möge hier genügen, daß die Entropie für eine bestimmte Wärmemenge der zweite Faktor ist, wenn als erster Faktor die mittlere Temperatur bekannt ist.

In Fig. 2 stellt die kleine schraffierte Fläche die einem Körper vom Zustande a zugeführte Wärmemenge dQ dar, durch welche er in den sehr nahe gelegenen Zustand b übergeführt wird. Dann ist

$$dQ = T \cdot dS.$$

Für einen größeren Abstand beider Zustände zwischen den Temperaturen T_1 und T_2 ist die Entropie $S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T}$.

Nehmen wir an, daß in einem Falle die spez. Wärme zwischen c und d konstant sei und der Körper keine Ver-

mehrung oder Verminderung seines Stoffes erfahre, so

$$\text{wird die Kurve } cd \text{ eine gerade Linie und } S = \frac{Q}{\frac{1}{2}(T_2 + T_1)}.$$

Beispiel 1. 1 kg eines Gases, welches eine konstante spez. Wärme von $c = 0,25$ haben möge, sei von $T = 0^\circ$ abs. auf $T_1 = 2000^\circ$ erwärmt worden, dann ist seine gesamte Wärme $Q = c \cdot G_1 \cdot T_1 = 0,25 \cdot 1 \cdot 2000 = 500 \text{ WE}$. Diese Wärme ist im Temperatur-Entropie-Diagramm Fig. 3 durch das Rechteck $o a_1 b_1 c_1$ dargestellt; in diesem Falle ist die Entropie $S = c = 0,25$.

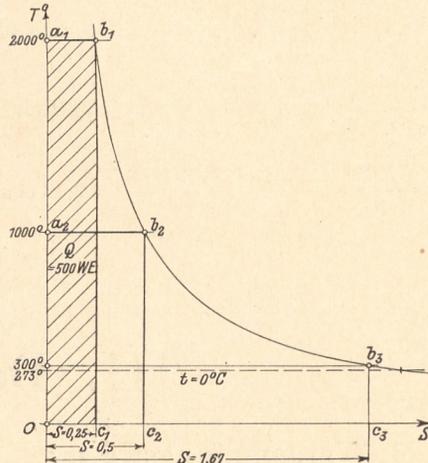


Fig. 3.

Fügt man nun allmählich weitere Mengen desselben Gases von der Temperatur $T = 0^\circ$ abs. hinzu, was nur in der Vorstellung möglich ist, so wird die hinzugebrachte Gasmenge erwärmt, die vorhandene abgekühlt, bis beide dieselbe Temperatur T_2 haben. Die Wärme Q wird dann durch das Rechteck $o a_2 b_2 c_2$ dargestellt; durch Fortsetzung dieses Verfahrens erhält man, da nach Voraussetzung die Wärmemenge gleichbleibt, weitere flächengleiche Rechtecke, deren Eckpunkte b_1, b_2, b_3 usw. auf einer Hyperbel liegen. Es nähert sich also die Temperatur asymptotisch dem absoluten Nullpunkt und die Entropie einem ∞ großen Wert.

Da nun Wärme nur dann nutzbar gemacht werden kann, wenn dieselbe von einem wärmeren zu einem kälteren Körper übergehen kann, so folgt, daß nur die oberhalb der Temperaturlinie dieses kälteren Körpers liegende Wärme ausgenutzt wird.

Ziehen wir diese Linie, tatsächlichen Verhältnissen entsprechend, bei $t = 27^\circ \text{C}$ oder $T = 300^\circ$, so ist für jeden Fall der thermische Wirkungsgrad gleich der Wärmefläche oberhalb der 300° -Linie dividiert durch die ganze Wärmefläche; oder da die Flächen Rechtecke sind, $\eta_{th} = \frac{T_1 - T_u}{T_1}$.

Daraus ergibt sich der Vorteil, der in der Verwendung hoher Temperaturen liegt. Für die Verwandlung in Arbeit kommt aber selbst theoretisch von der durch die obere Wärmefläche dargestellten Wärme nur ein Bruchteil in Betracht.

6. Die Zustandsgleichung.

Der Zustand eines Körpers wird in den wesentlichen Punkten durch die Wärmemenge bestimmt, welche ihm innewohnt, so in bezug auf die Temperatur, den Aggregatzustand, die Druck- und Raumverhältnisse.

Bei Gasen sind die Beziehungen von Temperatur, Druck und Rauminhalt bestimmt durch die Gleichung

$$v p = R T, \tag{3}$$

die sog. Zustandsgleichung, darin ist

- v das Volumen von 1 kg des Gases,
- p der Druck in kg/qm,
- T die absolute Temperatur,
- R die Gaskonstante, eine jedem Gase eigentümliche Zahl (s. Zahlentafel Nr. 2).

Diese Gleichung läßt sich auch schreiben:

$$V \cdot p = G \cdot R T, \quad (4)$$

wenn V ein beliebiges Volumen und G das Gewicht in kg dieses Volumens ist.

Beispiel 2. Welchen Raum nimmt 1 kg Luft bei 500° C und 600 mm Q. S. ein? $R_{\text{Luft}} = 29,27$.

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{29,27 \cdot (273 + 500)}{10\,000 \cdot \frac{600}{735,5}} = 2,78 \text{ cbm.}$$

Zahlentafel Nr. 2.

Gase	Zeichen	Atomzahl	Molekulargewicht μ angenähert	Gaskonstante R	Gewicht von 1 cbm bei		Spezifische Wärme bei 15° C bezog. auf 1 kg	
					15° C u. 1 at	bei 0° C u. 760 mm Q. S.	c_v	c_p
Wasserstoff . .	H ₂	2	2	420,0	0,0827	0,089	2,443	3,431
Sauerstoff . .	O ₂	2	32	26,5	1,312	1,428	0,154	0,216
Stickstoff . .	N ₂	2	28	30,2	1,151	1,252	0,176	0,247
Kohlenoxyd . .	CO	2	28	30,25	1,148	1,251	0,176	0,248
Kohlensäure . .	CO ₂	3	44	19,25	1,804	1,965	0,179	0,224
Schweflige Säure . . .	SO ₂	3	64	13,2	2,627	2,858	0,12	0,15
Methan (leicht. Kohlenwasserstoffgas) .	CH ₄	5	16	52,8	0,657	0,715	0,46	0,59
Äthylen (schwer. Kohlenwasserstoffgas) .	C ₂ H ₄	6	28	30,2	1,149	1,251	0,33	0,40
Atm. Luft (trocken) . .	—	—	29	29,27	1,188	1,293	0,170	0,239
Wasserdampf . .	H ₂ O	3	18	47,1	[0,779]	[0,804]	[0,33]	[∞,0,48]

III. Der Wasserdampf.

1. Verdampfungswärme.

Der Wasserdampf ist das Mittel, durch welches die Energie von den brennenden Kohlen nach dem Verwendungsort übertragen wird.

Zur Betrachtung der bei der Dampfbildung zu betrachtenden Vorgänge nehmen wir 1 kg Wasser von 0° C bei einem Luftdruck von $p = 1 \text{ kg/qcm}$ (735,5 mm Q. S.) zum Ausgang und denken uns dasselbe in einen wärmeundurchlässigen Zylinder von 1 qm Querschnitt eingefüllt und mit einem gewichts- und reibungslosen Kolben bedeckt (Fig. 4).

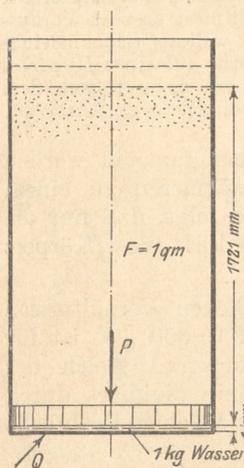


Fig. 4.

Führt man nun dem Wasser Wärme zu, so bemerkt man zunächst, daß die Temperatur desselben steigt, bis sie 99,1° C erreicht hat¹⁾, die Wärmezufuhr betrug $q = 99,6 \text{ WE}$. Weitere Wärmezufuhr bewirkt nun keine Temperatursteigerung, sondern dient zur Verdampfung des Wassers, welche genau nach dem Verhältnis der zugeführten Wärmemenge erfolgt.

Wenn der letzte Tropfen Wasser verdampft ist, sind weitere $r = 539,7 \text{ WE}$ zugeführt worden. Dabei hat sich der vom Dampf eingenommene Raum v' von 1 l allmählich auf $v = 1722 \text{ l}$ vergrößert. Diese Raumausdehnung beträgt $w = v - v' = 1721 \text{ l}$ und erfolgt gegen den auf dem Kolben lastenden Druck der Atmosphäre. Der Weg des Kolbens ist $s = 1,721 \text{ m}$, der gesamte Druck $F \cdot p = 10\,000 \text{ kg}$. Es ist dazu eine Arbeit aufgewendet worden von der Größe

$$p \cdot F \cdot s = p \cdot w = 17\,210 \text{ mkg,}$$

deren Betrag in Wärmeinheiten

$$A p w = \frac{1}{427} \cdot 17\,210 = 40,30 \text{ WE}$$

¹⁾ Daß die Temperatur von 100° C nicht erreicht wird, rührt daher, daß der Luftdruck geringer als 760 mm Q. S. ist.

ist. Der Rest

$$q = r - A p w = 539,7 - 40,30 = 499,4 \text{ WE}$$

ist zur Änderung des Aggregatzustandes verwendet worden.

Man hat nun allgemein folgende Bezeichnungen:

q = Flüssigkeitswärme, d. h. Wärmemenge, welche zur Erhöhung der Temperatur von 0° auf die Temperatur t ° des Dampfes diente (fühlbare Wärme).

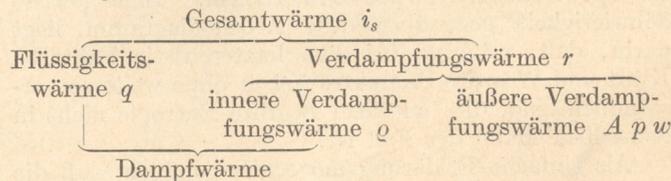
$A p w$ = äußere Verdampfungswärme (äußere latente Wärme), Wärmeanteil, welcher die Arbeit zur Überwindung des äußeren Druckes bestreiten muß.

q = innere Verdampfungswärme (innere latente Wärme), leistet die Molekulararbeit der Dampfbildung.

$r = q + A p w$ = Verdampfungswärme.

$i_s = q + r = q + q + A p w$ = Gesamtwärme.

Ein gutes Bild gibt folgendes Schema nach v. Reiche:



2. Gesättigter Dampf.

Dampf von der oben beschriebenen Entstehungsart, der also nur gerade die seinem Druck entsprechende Gesamtwärme i_s enthält, nennt man gesättigten Dampf.

Entzieht man solchem Dampf eine kleine Wärmemenge und sorgt dafür, daß der Druck gleich bleiben kann, was durch Raumverkleinerung bewirkt wird, so verflüssigt sich (kondensiert) ein Teil des Dampfes, aber die Temperatur bleibt gleich. Gesättigter Dampf von bestimmter Spannung kann nur bei der ihm eigenen Sättigungstemperatur und mit dem zu dieser Temperatur gehörigen Wärmeinhalt i_s für 1 kg bestehen.