

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).

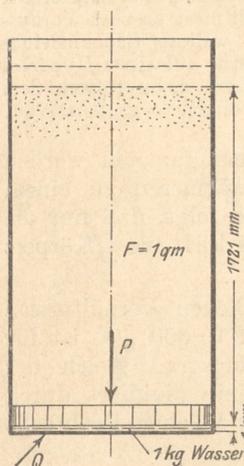


Fig. 4.

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).

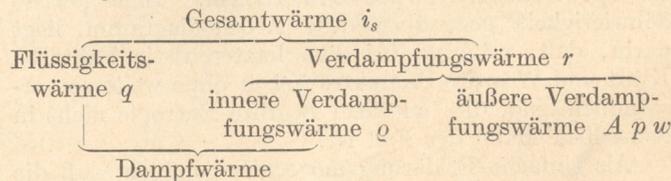
$A p w$ = äußere Verdampfungswärme (äußere latente Wärme), Wärmeanteil, welcher die Arbeit zur Überwindung des äußeren Druckes bestreiten muß.

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.

Zahlentafel Nr. 3.

1.		2.	3.	4.	5.	6.			7.	8.	9.
Druck in at abs. kg/qcm	i. at Über- druck kg/qcm	Tem- pera- tur t° C	Raum- inhalt von 1 kg Dampf v cbm/kg	Gewicht von 1 cbm Dampf γ kg/cbm	Flüssig- keits- wärme q WE	Verdampfungs- wärme			äuß. A p w WE	gesamte r WE	Ge- samt- wär- me i _s WE
						innere q WE	äuß. A p w WE	gesamte r WE			
0,02		17,3	68,126	0,01468	17,3	553,6	31,91	585,5	602,9		
0,04		28,8	35,387	0,02826	28,8	546,3	33,15	579,7	608,3		
0,06		36,0	24,140	0,04142	36,0	541,7	33,92	575,6	611,6		
0,08		41,3	18,408	0,05432	41,4	538,2	34,49	572,7	614,1		
0,10		45,6	14,920	0,06703	45,7	535,4	34,94	570,4	616,0		
0,12		49,2	12,568	0,07956	49,3	533,1	35,32	568,4	617,7		
0,15		53,7	10,190	0,09814	53,8	530,1	35,79	565,9	619,7		
0,20		59,8	7,777	0,12858	59,9	526,1	36,42	562,6	622,4		
0,25		64,6	6,307	0,1586	64,8	522,9	36,92	559,8	624,6		
0,30		68,7	5,316	0,1881	68,9	520,2	37,34	557,5	626,4		
0,35		72,3	4,600	0,2174	72,5	517,8	37,70	555,5	628,0		
0,40		75,5	4,060	0,2463	75,7	515,6	38,02	553,7	629,4		
0,50		80,9	3,2940	0,3036	81,2	512,0	38,56	550,5	631,7		
0,60		85,5	2,7770	0,3601	85,8	508,8	39,01	547,8	633,7		
0,70		89,5	2,4040	0,4160	89,9	506,1	39,39	545,5	635,3		
0,80		93,0	2,1216	0,4713	93,5	503,6	39,73	543,3	636,8		
0,90		96,2	1,9003	0,5262	96,7	501,4	40,03	541,4	638,1		
1,0		99,1	1,7220	0,5807	99,6	499,4	40,30	539,7	639,3		
1,1	0,1	101,8	1,5751	0,6349	102,3	497,5	40,55	538,1	640,7		
1,2	0,2	104,2	1,4521	0,6887	104,8	495,7	40,78	536,5	641,3		
1,4	0,4	108,7	1,2571	0,7955	109,4	492,6	41,18	533,7	643,1		
1,6	0,6	112,7	1,1096	0,9013	113,4	489,7	41,54	531,2	644,7		
1,8	0,8	116,3	0,9939	1,0062	117,1	487,1	41,85	528,9	646,0		
2,0	1,0	119,6	0,9006	1,1104	120,4	484,7	42,14	526,8	647,2		
2,5	1,5	126,7	0,7310	1,3680	127,7	479,4	42,74	522,2	649,9		
3,0	2,0	132,8	0,6163	1,6224	133,9	474,9	43,23	518,1	652,0		
3,5	2,5	138,1	0,5335	1,8743	139,4	470,8	43,65	514,5	653,8		
4,0	3,0	142,8	0,4708	2,1239	144,2	467,2	44,01	511,2	655,4		
4,5	3,5	147,1	0,4217	2,3716	148,6	463,9	44,33	508,2	656,8		
5,0	4,0	151,0	0,3820	2,6177	152,6	460,8	44,61	505,5	658,1		
5,5	4,5	154,6	0,3494	2,8624	156,3	458,0	44,87	502,9	659,2		
6,0	5,0	157,9	0,3220	3,1058	159,8	455,3	45,10	500,4	660,2		
6,5	5,5	161,1	0,2987	3,3481	163,0	452,8	45,32	498,1	661,1		
7,0	6,0	164,0	0,2786	3,5891	166,1	450,4	45,51	495,9	662,0		
7,5	6,5	166,8	0,2611	3,8294	168,9	448,2	45,67	493,9	662,8		
8,0	7,0	169,5	0,2458	4,0683	171,7	446,0	45,86	491,8	663,5		
8,5	7,5	172,0	0,2322	4,3072	174,3	443,9	46,02	489,9	664,2		
9,0	8,0	174,4	0,2200	4,5448	176,8	441,9	46,17	488,1	664,9		
9,5	8,5	176,7	0,2091	4,7819	179,2	440,0	46,30	486,3	665,5		
10,0	9,0	178,9	0,1993	5,018	181,5	438,2	46,43	484,6	666,1		
11,0	10,0	183,1	0,1822	5,489	185,8	434,6	46,67	481,3	667,1		
12,0	11,0	186,9	0,1678	5,960	189,9	431,3	46,88	478,2	668,1		
13,0	12,0	190,6	0,15565	6,425	193,7	428,2	47,08	475,3	668,9		
14,0	13,0	194,0	0,14515	6,889	197,3	425,2	47,26	472,5	669,7		
15,0	14,0	197,2	0,13601	7,352	200,7	422,4	47,43	469,8	670,5		
16,0	15,0	200,3	0,12797	7,814	203,9	419,7	47,58	467,3	671,2		
18,0	17,0	206,1	0,11450	8,734	210,0	414,6	47,85	462,4	672,4		
20,0	19,0	211,3	0,10365	9,648	215,5	409,8	48,08	457,9	673,4		

Für gesättigten Dampf gelten angenähert folgende Formeln:

$$r = 607 - 0,708 t, \tag{5}$$

$$i_s = 606,5 + 0,305 t, \tag{6}$$

$$p^{1,5} \cdot v = 1,7235 \quad (p \text{ in kg/qcm, } v \text{ in cbm/kg}). \tag{7}$$

Für den praktischen Gebrauch sind jedoch alle für den gesättigten Wasserdampf wichtigen Größen berechnet und in einer Zahlentafel zusammengestellt worden, zunächst auf Grund der Versuche Regnaults durch Fliegner und Zeuner und neuerdings nach den Versuchen von Knoblauch, Linde und Klebe durch R. Mollier¹⁾.

Diese Werte sind in der nebenstehenden Zahlentafel Nr. 3 teilweise abgedruckt.

3. Überhitzter Dampf.

Führt man gesättigtem Dampf noch mehr Wärme zu, so steigt seine Temperatur und man nennt solchen Dampf überhitzten Dampf. Die zur Überhitzung des Dampfes von t° C auf t'° C nötige Wärmemenge ist, wenn die Überhitzung bei konstantem Volumen erfolgt,

$$Q_v = c_v(t' - t), \tag{8}$$

und wenn sie bei konstantem Druck erfolgt,

$$Q_p = c_p(t' - t). \tag{9}$$

Der erste Fall hat für die Praxis wenig Bedeutung. Überhitzter Dampf kann die Wärme c_p(t' - t) abgeben und um t' - t abkühlen, ohne daß ein Teil desselben kondensiert; erst dann geht er in den Zustand des gesättigten Dampfes über und befolgt dessen Gesetze.

Die Temperatur des überhitzten Dampfes ist nicht abhängig von dem Drucke; nur kann sie nicht niedriger sein als diejenige des gesättigten Dampfes von gleichem Drucke. Überhitzter Dampf verhält sich im allgemeinen wie ein Gas.

Es kommen noch folgende Formeln in Betracht:

a) Die Zustandsgleichung von Tumlirz und R. Linde:

$$p(v + 0,016) = 47,1 T \quad (p \text{ in kg/qm}) \tag{10}$$

und

$$v = \frac{47,1 T}{p} - 0,016 \quad (v \text{ in cbm}). \tag{11}$$

b) Für die adiabatische Zustandsänderung (ohne Änderung des Wärmehaltes) gilt nach Zeuner:

$$p \cdot v^{1,3} = \text{konstant}. \tag{12}$$

c) Gesamtwärmehalt des Heißdampfes:

$$i_h = i_s + c_p(t' - t). \tag{13}$$

4. Das Wärmediagramm.

Zur deutlichen Veranschaulichung ist in Fig. 5 (Seite 6) das Wärmediagramm des Wasserdampfes von seiner Entstehung aus Eis an gezeichnet, worin der auf den absoluten Nullpunkt zulaufende Zweig der Kurve natürlich hypothetisch ist.

Die eingeschriebenen Entropiewerte sind der vollständigen Dampftabelle²⁾ entnommen. Die Flächen unterhalb der Kurve bis zur Abszissenachse stellen den jeweiligen Wärmehalt dar. Man sieht an der waagrechten dick gezogenen Linie unterhalb der Strecke cd,

¹⁾ Siehe R. Mollier, Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf. Berlin 1906.

²⁾ Hütte I, S. 334. 1908.

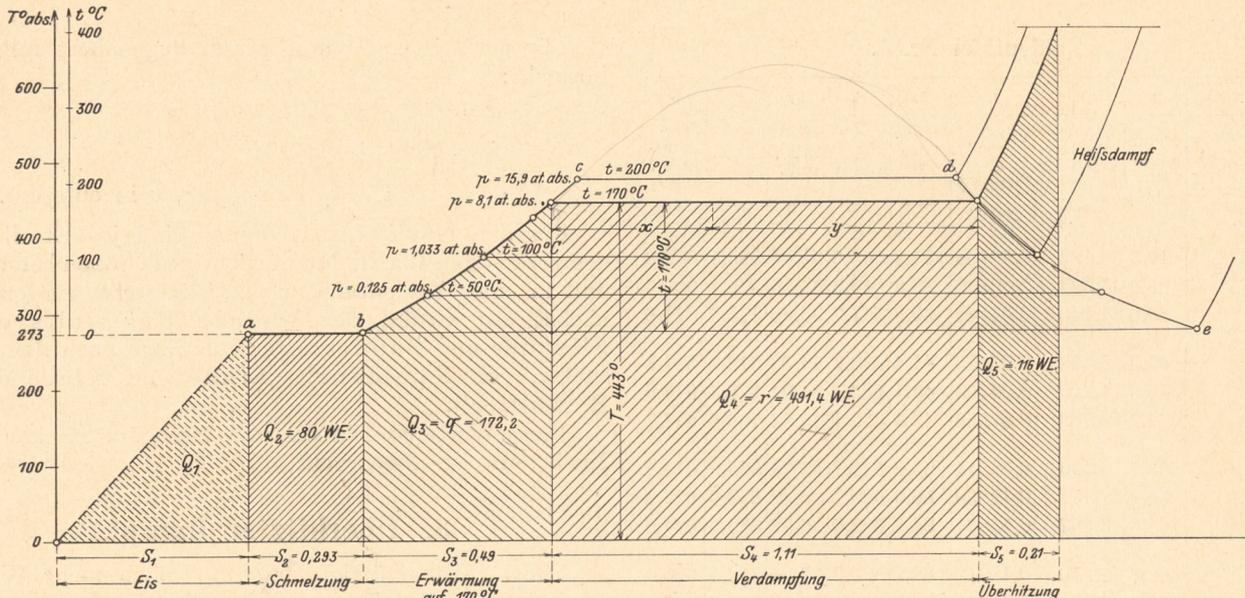


Fig. 5. Wärmediagramm des Wasserdampfes.

wie die Temperatur während der Verdampfung, hier z. B. bei 170° C und 8,1 at abs. konstant bleibt, während der Wärmeinhalt zunimmt. Die Kurve *bc*, untere Grenzkurve, bedeutet den Zustand der Flüssigkeit und den Beginn der Verdampfung, *de*,

obere Grenzkurve, bedeutet den Zustand der vollendeten Verdampfung und des trockenen Sattdampfes. Das Gebiet zwischen den beiden Grenzkurven ist dasjenige des Gemisches von Flüssigkeit und Dampf, das Gebiet rechts von der oberen Grenzkurve dasjenige des Heißdampfes.

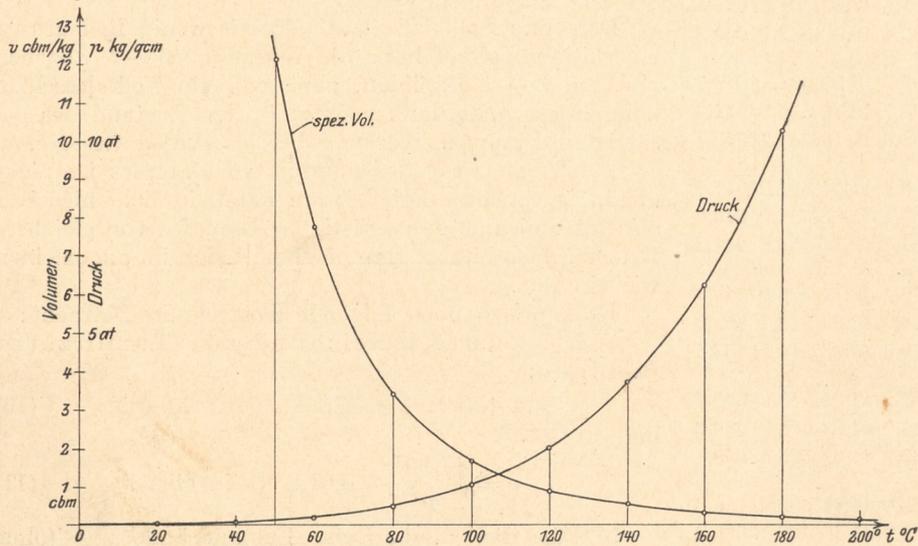


Fig. 6. Abhängigkeit von Druck und Volumen des gesättigten Dampfes von der Temperatur.

Die wagerechten Linien zwischen beiden Grenzkurven kennzeichnen nicht nur die Temperatur, sondern auch den Druck des nassen Sattdampfes. Jeder Punkt dieser Linien, der die Entfernung zwischen den Grenzkurven im Verhältnis $\frac{x}{y}$ teilt, bezeichnet dadurch zugleich das Verhältnis des Dampfes zu dem noch übrigen Wasser, sowie das Verhältnis der Wärmemengen, welche für die Verdampfung bereits verbraucht und noch aufzuwenden sind.

In Fig. 6 sind die abs. Drücke und spez. Volumina des gesättigten Dampfes in Abhängigkeit von der Temperatur aufgezeichnet.

IV. Die Verbrennung.

1. Vorbemerkung.

1 alte Atmosphäre = 760 mm Q.S. (Quecksilbersäule) = 10 333 mm W.S. (Wassersäule) = 1,033 kg/qcm.
 1 neue (metrische) Atmosphäre (1 at) = 735,5 mm Q.S. = 10000 mm W.S. = 1,0 kg/qcm; 1 mm Q.S. = 13,6 mm W.S.
 Gewicht trockner Luft bei 0° C und 760 mm Q. S. $\gamma_l = 1,293$ kg/cbm.

Zusammensetzung der Luft:
 nach Gewichtsteilen: 23,2 G.-T. Sauerstoff, 76,8 G.-T. Stickstoff;

nach Raumteilen: 21 R.-T. Sauerstoff, 79 R.-T. Stickstoff.
 1 cbm Luft enthält 0,3 kg Sauerstoff und 0,993 kg Stickstoff.

Die Rauminhalte sind in folgenden Ausführungen allgemein auf 760 mm Q.S. und 0° C bezogen.

Bezeichnungen:

h = Heizwert d. Brennstoffes in WE/kg für 1 kg Brennstoff
 L_{g_0} = theoretischer Luftbedarf in kg „ „ „
 L_{v_0} = „ „ in cbm „ „ „