

B. Thermodynamische Eigenschaften.

9. Temperatur¹⁾ und Temperaturmessung²⁾.

a) Temperaturfixpunkte.

Laut reichsgesetzlicher Regelung gilt in Deutschland für Temperaturangaben ausschließlich die hundertteilige thermodynamische Skale, die die Ausdehnung eines idealen Gases zugrunde legt. Dabei bilden in Übereinstimmung mit internationalen Übereinkommen mehrere bestimmte Festpunkte als Zahlenwerte die Grundlage. Diese sind folgende:

1. Sauerstoffpunkt. Siedetemperatur von flüssigem Sauerstoff bei 760 Torr — 182,97°
Für etwas abweichende Drucke gilt die Beziehung:
 $t_p = t_{760} + 0,0126 (p - 760) - 0,0000065 (p - 760)^2$
2. Eispunkt. Gleichgewichtstemperatur zwischen schmelzendem Eis und luftgesättigtem Wasser. ± 0,000°
3. Dampfpunkt. Siedetemperatur von Wasser bei 760 Torr + 100,000°
 $(t_p = t_{760} + 0,0367 (p - 760) - 0,000023 (p - 760)^2)$
4. Schwefelpunkt. Siedetemperatur von Schwefel bei 760 Torr + 444,60°
 $(t_p = t_{760} + 0,0909 (p - 760) - 0,000048 (p - 760)^2)$
5. Silberpunkt. Schmelzpunkt von reinstem Silber bei 760 Torr + 960,5°
6. Goldpunkt. Schmelzpunkt von reinstem Gold bei 760 Torr 1063°

Im Temperaturbereich von — 190 bis + 650° wird die Interpolation zwischen den international festgelegten Festpunkten mittels eines Platin-Widerstandsthermometers vorgenommen, zwischen 650 und 1063°

¹⁾ Vgl. Landoldt-Börnstein, 2. Ergänz.-Bd., S. 1149 (1931).

²⁾ Für Temperaturmessungen bei Abnahmeversuchen sind im Jahr 1936 »Regeln« erschienen. Bezugsquelle dieser Regeln: VDI-Verlag, Berlin, Preis RM. 2.00.

mittels eines Platin-Platinrhodium-Thermoelementes. Im letzteren Fall soll die elektromotorische Kraft zwischen 1063° und einer Bezugstemperatur von 0° C $10,30 \pm 0,10$ Millivolt betragen.

Weitere Hilfsfixpunkte sind folgende:

1. Sublimationstemperatur des Kohlendioxyds bei 760 Torr	— 78,50°
$t_p = t_{760} + 0,01595 (p - 760) - 0,000011 (p - 760)^2$	
2. Schmelztemperatur von Quecksilber	— 38,87°
3. Umwandlungstemperatur von Natriumsulfat	+ 32,38°
4. Siedetemperatur von Naphthalin	+ 217,96°
$t_p = t_{760} + 0,058 (p - 760)$ (gültig für $p = 750$ bis 760 Torr)	
5. Erstarrungstemperatur von Zinn	+ 231,85°
6. Erstarrungstemperatur von Kadmium	+ 320,9°
7. Erstarrungstemperatur von Zink	+ 419,45°
8. Erstarrungstemperatur von Antimon	+ 630,5°
9. Erstarrungstemperatur von Kupfer	+ 1083°
10. Schmelztemperatur von Palladium	+ 1557°
11. Schmelztemperatur von Platin	+ 1770°
12. Schmelztemperatur von Wolfram	+ 3400°

Bei Temperaturen oberhalb 1063° (Goldpunkt) erfolgt die Temperaturbestimmung durch Messung des Intensitätsverhältnisses J/J_{Au} der Strahlung des bei der Wellenlänge λ sichtbaren Lichtes eines schwarzen Körpers bei der Temperatur t und der Temperatur des Goldpunktes gemäß der Beziehung

$$\log \text{nat} \frac{J}{J_{Au}} = \frac{1,432}{\lambda} \left(\frac{1}{1336} - \frac{1}{t + 273} \right),$$

wobei $\lambda \cdot (t + 273) < 0,3$ cm Grad sein muß.

b) Temperaturmeßgeräte.

1. Flüssigkeitsthermometer.

a) Quecksilberthermometer. Meßbereich von Thermometern aus Jenaer Normalglas von -39 bis $+500^\circ$, aus geschmolzenem Quarzglas bis $+750^\circ$.

Korrektur für den herausragenden Faden bei Quecksilberthermometern.

Wenn bei einem Thermometer aus Jenaer Normalglas, das eine Temperatur von t_a ° C anzeigt, n Grade aus dem Gerät herausragen und die Skala eine mittlere Temperatur von t_b ° besitzt, so müssen infolge

des scheinbaren Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers in Quarzglas von $k = 0,00016$ zu der abgelesenen Temperatur $0,00016 n (t_a - t_b)$ Grad hinzugezählt werden, um die wahre Temperatur t zu ermitteln.

$$t = t_a + 0,00016 n (t_a - t_b).$$

b) Für einfache Temperaturmessungen oder sehr tiefe Temperaturen verwendet man häufig Thermometer mit einer Füllung von gefärbtem Alkohol, Toluol (beide bis -100°), Petroläther oder Pentan (beide bis -200°).

2. Gasthermometer bestehen aus einem zylindrischen Glas- oder seltener Metallgefäß, das mit Wasserstoff, Helium, Luft oder Stickstoff gefüllt ist, das über eine Kapillare mit einem Quecksilbermanometer in Verbindung steht. Der Druck soll bei 0° 100 cm Quecksilber betragen. Die Eichung erfolgt bei 0 und 100° .

3. Thermoelemente bestehen aus zwei mittels einer Lötstelle verbundenen Drähten aus verschiedenen Metallen. Beim Erhitzen der Lötstelle entsteht eine durch ein Millivoltmeter meßbare Potentialdifferenz (Thermokraft), indem bei dem geschlossenen Stromkreis die Verbindungen der Drahtenden mit dem Galvanometer (zumeist aus Kupfer) die kalt gehaltenen Nebenlötstellen darstellen. Die Thermokraft der einzelnen Metalle wird auf Platin als Normalmetall bezogen. Im einzelnen ergibt sich dabei folgende »thermoelektrische Spannungsreihe«:

Thermokraft verschiedener Metalle und Legierungen gegen Platin für einen Temperaturabfall von $+100$ auf 0° C.

	Millivolt		Millivolt
Konstantan (60 Cu, 40 Ni)	+ 3,5	Platin-Rhodium (90 Pt, 10 Rh)	- 0,6
Nickel	+ 1,7	Manganin (84 Cu, 4 Ni, 12 Mn)	- 0,65
Palladium	+ 0,5	Kupfer	- 0,7
Platin	0	Silber	- 0,75
Blei	- 0,4	Gold	- 0,75
Aluminium	- 0,4	Eisen	- 1,5 bis - 1,9

Für jedes beliebige Leiterpaar ergibt sich die Thermokraft E aus dem Unterschied der oben angeführten Zahlen, beispielsweise für

$$(E_{\text{Konstantan} - \text{Silber}})_{00}^{100} = 4,25 \text{ Millivolt.}$$

Als eichfähiges Normalthermoelement dient das Platin-Platin-Rhodium-Element (Pt — 90 Pt, 10 Rh), dessen Thermokraft E durch die Gleichung

$$E = -310 + 8,084 t + 0,00172 t^2$$

ausgedrückt werden kann und in der t die Temperatur der Lötstelle bedeutet, während die Kaltlötstellen auf 0° gehalten werden.

4. Pyrometer in den verschiedensten Ausführungsformen beruhen auf der Messung der Strahlung eines glühenden Körpers, wobei die Messungen streng genommen nur für die Strahlung des »absolut schwarzen Körpers« gelten. Meßgenauigkeit moderner Geräte ± 5 bis 10^0 .

Eine Schätzung der Temperatur allein nach der Glühfarbe des erhitzten Körpers ist ziemlich ungenau.

Glühfarben von Stahl.

Temp.-Bereich °C	Glühfarbe	Temp.-Bereich °C	Glühfarbe	Temp.-Bereich °C	Glühfarbe
520—575	schwarzbraun	775— 800	kirschrot	1050—1150	dunkelgelb
575—650	braunrot	800— 825	hellkirschrot	1150—1250	hellgelb
650—750	dunkelrot	825— 875	hellrot	> 1250	weiß
750—775	dunkelkirschrot	875—1050	gelbrot		

Anlaßfarben von Stahl.

Temp. °C	Anlaßfarbe	Temp. °C	Anlaßfarbe	Temp. °C	Anlaßfarbe
200	weiß	260	braunviolett	300	hellblau
220	strohgelb	270	purpur	310	graublau
240	ocker	280	violett	320	graugrünlich
250	gelbrot	290	dunkelblau		

5. Segerkegel sind kleine dreiseitige Pyramiden von 6 cm Höhe aus Gemischen von Feldspat, Ton und Quarz, deren Zusammenschmelzen beobachtet wird. Als Endtemperatur gilt der Augenblick des Berührens der Kegelspitze auf der Unterlage.

Schmelztemperaturen der Segerkegel (KSP.) in °C (in möglichst neutraler Ohmatmosphäre).

Sk.-Nr. KSP.	022 600	021 650	020 670	019 690	018 710	017 730	016 750	015a 790	014a 815	013a 835
Sk.-Nr. KSP.	012a 855	011a 880	010a 900	09a 920	08a 940	07a 960	06a 980	05a 1000	04a 1020	03a 1040
Sk.-Nr. KSP.	02a 1060	01a 1080	1a 1100	2a 1120	3a 1140	4a 1160	5a 1180	6a 1200	7 1230	8 1250
Sk.-Nr. KSP.	9 1280	10 1300	11 1320	12 1350	13 1380	14 1410	15 1435	16 1460	17 1480	18 1500
Sk.-Nr. KSP.	19 1520	20 1530	26 1580	27 1610	28 1630	29 1650	30 1670	31 1690	32 1710	33 1730
Sk.-Nr. KSP.	34 1750	35 1770	36 1790	37 1825	38 1850	39 1880	40 1920	41 1960	42 2000	— —

c) Thermokräfte verschiedener Thermoelemente in Millivolt
(nach Heraeus).

Temp. °C	Elementenpaar						
	Kupfer- Kon- stantan	Silber- Kon- stantan	Eisen- Kon- stantan	Chrom- nickel-Kon- stantan	Nickel- Nickel- chrom	Pallaplat ¹⁾	Platin- Platin- rhodium ²⁾
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	3,45	3,45	4,25	4,40	3,25	2,36	0,53
200	8,35	8,35	9,75	10,60	7,30	6,04	1,31
300	13,80	13,80	15,25	17,40	11,40	10,10	2,20
400	19,75	19,75	20,85	24,90	15,50	14,56	3,14
500	26,15	26,15	26,50	32,50	19,80	19,22	4,10
600	32,95	32,95	32,20	40,10	24,05	24,22	5,11
700	—	—	—	—	28,30	29,36	6,15
800	—	—	—	—	32,20	34,58	7,22
900	—	—	—	—	36,45	39,85	8,32
1000	—	—	—	—	40,65	44,98	9,45
1100	—	—	—	—	44,80	50,03	10,62
1200	—	—	—	—	48,95	54,08	11,81
1300	—	—	—	—	—	59,88	13,00
1400	—	—	—	—	—	—	14,19
1500	—	—	—	—	—	—	15,37
1600	—	—	—	—	—	—	16,55
max. Ab- weichung vom Nor- malwert	± 1,5%	± 1,5%	± 1,5%	± 1,5%	± 0,8%	± 0,5%	± 0,3%

¹⁾ Plusschenkel 95% Platin + 5% Rhodium, Minusschenkel 50% Palladium + 50% Gold.
²⁾ Plusschenkel 90% Platin + 10% Rhodium, Minusschenkel Platin.

Mittels Thermoelementen wird nicht die wirkliche Temperatur sondern nur der Temperaturunterschied zwischen der Lötstelle des Elements und seinen freien Enden bzw. seinen Anschlußklemmen gemessen. Diese »Kaltstellen« sollen tunlichst auf 20° gehalten werden. Wenn dies infolge der Kürze des Thermoelements oder aus anderen Gründen unmöglich ist, sind an die Drahtenden entweder Ausgleichleitungen (aus dem gleichen Metall) anzuschließen oder es sind entsprechende Temperaturberichtigungen erforderlich. Wenn beispielsweise bei einer Temperatur der Lötstelle von 1000° die Klemmentemperatur an Stelle von 20° 80° beträgt, so zeigt das Ablesegerät nicht 1000° sondern 80—20 = 60° weniger, mithin nur 940° an. Zu der abgelesenen Temperatur müssen daher 60° hinzugezählt werden. Das gleiche gilt im umgekehrten Sinne für tiefere Temperaturen als + 20°. Diese Berichtigung kann in Fortfall gebracht werden, wenn das Anzeigergerät vor Beginn der Messung mittels der hierfür angebrachten Stellenschraube auf die Temperatur der freien Enden eingestellt wird. Wenn dies unmöglich ist, gilt als Regel, daß bei Edelmetall-Elementen nur der halbe Unterschied, bei Nickel-Chromnickel- und Eisen-Elementen dagegen der gesamte Temperaturunterschied abzuziehen bzw. zuzuzählen ist.

10. Joule-Thomson-Effekt.

a) Begriff.

Die Temperaturänderung, die ein Gas beim Strömen durch eine Drosselstelle ohne Wärmez- oder -ableitung unter Druckverminderung erfährt, wird als Joule-Thomson-Effekt bezeichnet. Der »differentiale« Joule-Thomson-Effekt a_i bedeutet dabei das Verhältnis von einer unendlich kleinen Temperaturänderung zu einer unendlich kleinen Drucksenkung:

$$a_i = \left(\frac{\Delta t}{\Delta p} \right)$$

unter der Voraussetzung, daß bei der Entspannung durch Drosselung der Wärmeinhalt des Systems gleich bleibt. Unter praktischen Verhältnissen wird mit dem differentialen Joule-Thomson-Effekt die Temperaturänderung in °C ausgedrückt, die bei einer Senkung des Gasdruckes um 1 at eintritt.

Bei einer Entspannung über einen größeren Druckbereich wird die stattfindende Temperaturänderung als »integraler« Joule-Thomson-Effekt bezeichnet.

Rechnerisch läßt sich die Temperaturänderung Δt eines Gases bei bekannter spezifischer Wärme C_p und bekanntem Ausdehnungskoeffizienten v für die Druckänderung Δp aus der Summe von innerer und äußerer Arbeit berechnen. Thermodynamisch gilt:

$$\Delta t = \frac{1}{C_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \cdot \Delta p.$$

Unter Zugrundelegung der van der Waals'schen Zustandsgleichung bei Ersatz der Konstanten a , b und R durch die kritischen Daten erhält man ferner mit genügender Annäherung

$$\Delta t = C_p \left[\frac{9}{2} \left(\frac{T_k}{T} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \cdot v_k \cdot \Delta p.$$

Bei einem differential kleinen Druckabfall ergibt sich ferner die Inversionstemperatur T_i zu $T_i = \sqrt{18 \cdot T_k}$.

b) Joule-Thomson-Effekt verschiedener Gase bei 0° C. °C/at

	Druck in at						
	0	10	20	40	60	80	100
Luft	0,28	0,27	0,26	0,24	0,23	0,21	0,19
Kohlendioxid	1,20	1,31	1,43	1,46	—	—	—
Sauerstoff	0,33	0,32	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24

Joule-Thomson-Effekt von Luft für — 175 bis + 10° und für 0 bis 210 at siehe H. Hausen, Forschungsarb. VDI 1926, Heft 274.

11. Wärmeausdehnung.

a) Begriff.

Bei der Erwärmung eines Stabes von der Länge l_0 bei 0° auf $t^\circ \text{C}$ erfährt dieser eine Ausdehnung auf l_t .

$$l_t = l_0 (1 + \beta t).$$

Der lineare Ausdehnungskoeffizient β ist für die einzelnen Stoffe verschieden groß.

Für einen Würfel mit der Kantenlänge l_0 beträgt die räumliche Ausdehnung

$$l_t^3 = l_0^3 (1 + \beta t)^3,$$

oder mit großer Annäherung (da β^2 und β^3 sehr kleine Größen darstellen)

$$l_t^3 = l_0^3 (1 + 3\beta t)$$

oder allgemein für einen festen oder flüssigen Körper

$$v_t = v_0 (1 + 3\beta t).$$

b) Lineare Ausdehnung fester Stoffe.

Stoff	Temp.- Bereich °C	$\beta \cdot 10^6$	Stoff	Temp.- Bereich °C	$\beta \cdot 10^6$
Aluminium	0—100	23,7	Konstantan	0—100	15,2
»	0—300	25,7	»	0—500	16,8
»	0—500	27,4	Kupfer	0—100	16,2
Bakelit	0—100	29,5	»	0—500	18,1
Blei	0—100	28,9	Magnesia	0—1200	12,6
» (flüssig)	350	127	Mangan	0—100	22,8
Bronze	0—100	15—18	Marmor	15—100	11,7
Chromit	0—1500	10,5	Marquardmasse	0—600	5,1
Eis	—10—0	50,7	»	0—1200	6,1
Eisen, rein (α)	0—100	11,7	Messing	0—100	19,0
» » (?)	900—1000	22,2	»	0—500	21,6
Fluß-	0—100	12,0	Neusilber	0—100	18,4
»	0—500	14,1	Nickel	0—100	13,0
Flußstahl	0—100	11,7	»	0—1000	16,8
»	0—500	13,8	Nickelstahl	0	5—12
Eisen, Guß-	0—100	10,4	Paraffin	0—15	190
»	0—500	12,8	Platin	0—100	9,0
» , Schweiß-	0—100	12,2	»	0—1000	10,2
»	0—500	14,0	Porzellan, Berlin	0—600	5,0
Glas, Thüringer	0—100	9,3—9,8	» , »	0—1200	5,9
» , Jenaer 1565 III	0—100	3,45	» , Meißen	0—600	3,9
Gold	0—100	14,3	» , »	0—1200	4,7
Hartgummi	0	60—70	Pythagorasmasse	0—600	4,7
»	30	80—90	»	0—1200	5,7
Holz, Eiche	0—35	4,9	Quarz, geschm.	0—500	5,4
» , » \perp	0—35	54,5	Quarzglas	0—1000	4,8
» , Fichte	0—35	5,4	Silber	0—100	19,7
» , » \perp	0—35	34,0	»	0—800	22,1
» , Tanne	0—35	3,7	Siliciumkarbid	0—900	4,7
» , » \perp	0—35	54,4	Sillimanit	0—900	4,8
Kobalt	0—100	12,5	Tonerde, geschm.	0—900	7,1
Kohlenstoff, Dia-			Wachs	20	200—300
» , Gra-	50	1,32	Wolframdraht	0—100	4,4
» , phit	20—100	1,9—2,9	Zink	0—100	16,5
			Zinn	0—100	26,5

c) Linearer Ausdehnungskoeffizient der verschiedenen Modifikationen der Kieselsäure.

(Nach Travers und de Golonbinoff, Rev. de Métall. 1926, 28.)

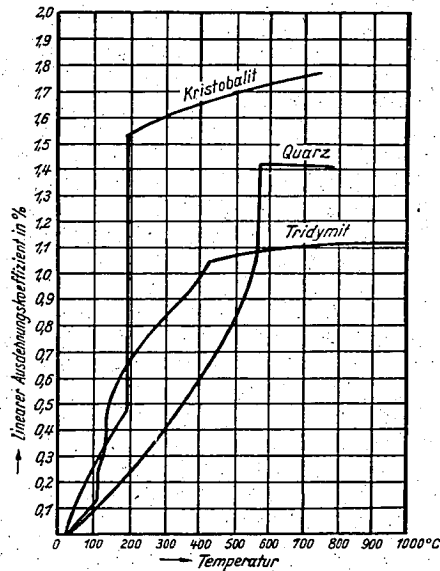


Abb. 3.

d) Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient feuerfester Steine zwischen 20 und 1000°.

(Nach Schulz und Kanz, Stahl u. Eisen 52, 18, 1932.)

Steinmaterial	Grenzwerte	Steinmaterial	Grenzwerte
Schamottesteine, quarzfrei	4,40 — 5,09 · 10 ⁻⁶	Chromitsteine	7,27 — 9,08 · 10 ⁻⁶
handelsübl.	5,51 — 6,81 · 10 ⁻⁶	Bauxitsteine	5,19 — 6,51 · 10 ⁻⁶
Quarzschamottesteine	4,99 — 6,29 · 10 ⁻⁶	Korundsteine	5,58 — 7,03 · 10 ⁻⁶
Silikasteine	12,72 — 15,41 · 10 ⁻⁶	Sillimanit	4,93 · 10 ⁻⁶
Quarzschiefersteine	18,29 — 18,65 · 10 ⁻⁶	Zirkonsteine	5,01 — 5,66 · 10 ⁻⁶
Magnesitsteine	13,74 — 14,53 · 10 ⁻⁶	Karborundumsteine	4,37 — 5,42 · 10 ⁻⁶
Magnesiamasse	13,86 — 14,48 · 10 ⁻⁶		

e) Ausdehnungskoeffizient von Flüssigkeiten bei 20°.

Äthylalkohol	0,00110	Petroleum	0,00090 — 0,0010
Äthyläther	0,00160	Quecksilber	0,000181
Benzin	0,0012 — 0,0016	Schmieröl	0,00060 — 0,00070
Benzol	0,00125	Schwefelkohlenstoff	0,0012
Erdöl	0,00065 — 0,0012	Schwefelsäure (96 %ig)	0,00055
Glyzerin	0,00050	Steinkohlenteer	0,0005 — 0,0007
Methanol	0,00115	Terpentinöl	0,00100
Oktan	0,00112	Tetrachlorkohlenstoff	0,00123
Paraffinöl	0,00076	Tetralin	0,00078
Pentan	0,00159	Wasser	s. S. 18

12. Sättigungsdruck (Dampfdruck).

a) Begriff.

Der Sättigungsdruck eines Stoffes stellt den Druck dar, den der Dampf desselben im Sättigungszustand bei einer gegebenen Temperatur besitzt. Der Sättigungsdruck ist nur von der Temperatur, nicht dagegen von dem Drucke der Atmosphäre abhängig.

Mathematisch kann der Verlauf des Sättigungsdruckes über ein größeres Temperaturgebiet durch die Dampfdruckformel von van der Waals

$$\ln \frac{p}{p_k} = f \left(1 - \frac{T_k}{T} \right)$$

ausgedrückt werden, in der p_k und T_k den kritischen Druck bzw. die kritische Temperatur bedeuten. Häufig, vor allem in den Vereinigten Staaten, wird ferner der Sättigungsdruck auch durch die Formel von Rankine

$$\log p = A - \frac{B}{T} + C \cdot \log T$$

mathematisch dargestellt. In dieser bedeuten A , B und C empirische Konstanten.

Für die Sättigungsdrucke der beiden Bestandteile A und B eines Zweistoffgemisches gilt das Planksche Gesetz:

$$\frac{p}{P} = \frac{\frac{x}{M_1}}{\frac{x}{M_1} + \frac{y}{M_2}}$$

Darin bedeuten:

- p den Dampfdruck des Bestandteils A in der Lösung,
- P den Dampfdruck des Bestandteils A in reinem Zustand bei gleicher Temperatur,
- x die Menge des Bestandteils A in %,
- y die Menge des Bestandteils B in % ($y = 100 - x$),
- M_1 das Molekulargewicht des Bestandteils A ,
- M_2 das Molekulargewicht des Bestandteils B .

Voraussetzung für die Gültigkeit des Plankschen Gesetzes ist gegenseitige Löslichkeit der beiden Bestandteile in jedem Mischungsverhältnis. Ferner dürfen diese keine Molekularassoziation aufweisen.

b) Sättigungsdruck des Wasserdampfes
in Torr.
(Nach Holborn, Scheel und Henning, Wärmetabellen,
Braunschweig 1919.)

Grade	Zehntelgrade									
	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	4,579	4,613	4,647	4,681	4,715	4,750	4,785	4,820	4,855	4,890
1	4,926	4,962	4,998	5,034	5,070	5,107	5,144	5,181	5,219	5,256
2	5,294	5,332	5,370	5,408	5,447	5,486	5,525	5,565	5,605	5,645
3	5,685	5,752	5,766	5,807	5,848	5,889	5,931	5,973	6,015	6,058
4	6,101	6,144	6,187	6,230	6,274	6,318	6,363	6,408	6,453	6,498
5	6,543	6,589	6,635	6,681	6,728	6,775	6,822	6,869	6,917	6,965
6	7,013	7,062	7,111	7,160	7,209	7,259	7,309	7,360	7,411	7,462
7	7,513	7,565	7,617	7,669	7,722	7,775	7,828	7,882	7,936	7,990
8	8,045	8,100	8,155	8,211	8,267	8,323	8,380	8,437	8,494	8,551
9	8,609	8,668	8,727	8,786	8,845	8,905	8,965	9,025	9,086	9,147
10	9,209	9,271	9,333	9,395	9,458	9,521	9,585	9,649	9,714	9,779
11	9,844	9,910	9,976	10,042	10,109	10,176	10,244	10,312	10,380	10,449
12	10,518	10,588	10,658	10,728	10,799	10,870	10,941	11,013	11,085	11,158
13	11,231	11,305	11,379	11,453	11,528	11,604	11,680	11,756	11,833	11,910
14	11,987	12,065	12,144	12,223	12,302	12,382	12,462	12,543	12,624	12,706
15	12,788	12,870	12,953	13,037	13,121	13,205	13,290	13,375	13,461	13,547
16	13,634	13,721	13,809	13,898	13,987	14,076	14,166	14,256	14,347	14,438
17	14,530	14,622	14,715	14,809	14,903	14,997	15,092	15,188	15,284	15,380
18	15,477	15,575	15,673	15,772	15,871	15,971	16,071	16,171	16,272	16,374
19	16,477	16,581	16,685	16,789	16,894	16,999	17,105	17,212	17,319	17,427
20	17,535	17,644	17,753	17,863	17,974	18,085	18,197	18,309	18,422	18,536
21	18,650	18,765	18,880	18,996	19,113	19,231	19,349	19,468	19,587	19,707
22	19,827	19,948	20,070	20,193	20,316	20,440	20,565	20,690	20,815	20,941
23	21,068	21,196	21,324	21,453	21,583	21,714	21,845	21,977	22,110	22,243
24	22,377	22,512	22,648	22,785	22,922	23,060	23,198	23,337	23,476	23,616
25	23,756	23,897	24,039	24,182	24,326	24,471	24,617	24,764	24,912	25,060
26	25,209	25,359	25,509	25,660	25,812	25,964	26,117	26,271	26,426	26,582
27	26,739	26,897	27,055	27,214	27,374	27,535	27,696	27,858	28,021	28,185
28	28,349	28,514	28,680	28,847	29,015	29,184	29,354	29,525	29,697	29,870
29	30,043	30,217	30,392	30,568	30,745	30,923	31,102	31,281	31,461	31,642
30	31,824	32,007	32,191	32,376	32,561	32,747	32,934	33,122	33,312	33,503
31	33,695	33,888	34,082	34,276	34,471	34,667	34,864	35,062	35,261	35,462
32	35,663	35,865	36,068	36,272	36,477	36,683	36,891	37,099	37,308	37,518
33	37,729	37,942	38,155	38,369	38,584	38,801	39,018	39,237	39,457	39,677
34	39,898	40,121	40,344	40,569	40,796	41,023	41,251	41,480	41,710	41,942

Grade	Zehntelgrade									
	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
35	42,175	42,409	42,644	42,880	43,117	43,355	43,595	43,836	44,078	44,320
36	44,563	44,808	45,054	45,301	45,549	45,799	46,050	46,302	46,556	46,811
37	47,067	47,324	47,582	47,841	48,102	48,364	48,627	48,891	49,157	49,424
38	49,692	49,961	50,231	50,202	50,774	51,048	51,323	51,600	51,879	52,160
39	52,442	52,725	53,009	53,294	53,580	53,867	54,156	54,446	54,737	55,030
40	55,324	55,61	55,91	56,21	56,51	56,81	57,11	57,41	57,72	58,03
41	58,34	58,65	58,96	59,27	59,58	59,90	60,22	60,54	60,86	61,18
42	61,50	61,82	62,14	62,47	62,80	63,13	63,46	63,79	64,12	64,46
43	64,80	65,14	65,48	65,82	66,16	66,51	66,86	67,21	67,56	67,91
44	68,26	68,61	68,97	69,33	69,69	70,05	70,41	70,77	71,14	71,51
45	71,88	72,25	72,62	72,99	73,36	73,74	74,12	74,50	74,88	75,26
46	75,65	76,04	76,43	76,82	77,21	77,60	78,00	78,40	78,80	79,20
47	79,60	80,00	80,41	80,82	81,23	81,64	82,05	82,46	82,87	83,29
48	83,71	84,13	84,56	84,99	85,42	85,85	86,28	86,71	87,14	87,58
49	88,02	88,46	88,90	89,34	89,79	90,24	90,69	91,14	91,59	92,05
50	92,51	92,97	93,43	93,89	94,36	94,82	95,29	95,77	96,24	96,72
51	97,20	97,68	98,16	98,64	99,13	99,62	100,11	100,60	101,10	101,59
52	102,09	102,59	103,10	103,60	104,11	104,62	105,13	105,64	106,16	106,68
53	107,20	107,72	108,24	108,76	109,29	109,82	110,35	110,89	111,43	111,97
54	112,51	113,05	113,59	114,14	114,69	115,24	115,80	116,36	116,92	117,48
55	118,04	118,60	119,16	119,73	120,31	120,89	121,47	122,05	122,63	123,21
56	123,80	124,40	124,99	125,58	126,18	126,78	127,38	127,99	128,60	129,21
57	129,82	130,44	131,06	131,68	132,30	132,92	133,55	134,18	134,81	135,45
58	136,08	136,72	137,36	138,01	138,66	139,31	139,96	140,62	141,28	141,94
59	142,60	143,27	143,94	144,61	145,28	145,96	146,64	147,32	148,00	148,69
60	149,38	150,07	150,77	151,47	152,17	152,87	153,58	154,29	155,00	155,71
61	156,43	157,15	157,87	158,59	159,32	160,06	160,80	161,58	162,28	163,02
62	163,77	164,52	165,27	166,02	166,78	167,54	168,30	169,07	169,84	170,61
63	171,38	172,16	172,94	173,73	174,52	175,31	176,10	176,90	177,70	178,50
64	179,31	180,11	180,92	181,74	182,56	183,38	184,20	185,03	185,86	186,70
65	187,54	188,38	189,22	190,06	190,91	191,77	192,63	193,49	194,35	195,42
66	196,09	196,96	197,84	198,72	199,60	200,48	201,37	202,26	203,16	204,06
67	204,96	205,87	206,78	207,69	208,61	209,53	210,45	211,37	212,30	213,23
68	214,17	215,11	216,06	217,01	217,96	218,91	219,87	220,83	221,79	222,76
69	223,73	224,71	225,69	226,67	227,66	228,65	229,65	230,65	231,65	232,65
70	233,7	234,7	235,7	236,7	237,8	238,8	239,8	240,9	241,9	242,9
71	243,9	245,0	246,0	247,1	248,1	249,2	250,3	251,4	252,4	253,5
72	254,6	255,7	256,8	257,9	259,0	260,1	261,2	262,3	263,5	264,6
73	265,7	266,8	268,0	269,1	270,3	271,4	272,6	273,7	274,9	276,0
74	277,2	278,4	279,5	280,7	281,9	283,1	284,3	285,5	286,7	287,9

Grade	Zehntelgrade									
	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
75	289,1	290,3	291,5	292,8	294,0	295,2	296,5	297,7	298,9	300,2
76	301,4	302,7	303,9	305,2	306,5	307,7	309,0	310,3	311,6	312,9
77	314,1	315,4	316,7	318,0	319,3	320,7	322,0	323,3	324,7	326,0
78	327,3	328,7	330,0	331,4	332,7	334,1	335,5	336,8	338,2	339,6
79	341,0	342,4	343,8	345,2	346,6	348,0	349,4	350,8	352,2	353,7
80	355,1	356,5	358,0	359,4	360,9	362,4	363,8	365,3	366,8	368,3
81	369,7	371,2	372,7	374,2	376,7	377,3	379,8	380,3	381,8	383,4
82	384,9	386,4	388,0	389,5	391,1	392,7	394,2	395,8	397,4	399,0
83	400,6	402,2	403,8	405,4	407,0	408,6	410,3	411,9	413,5	415,2
84	416,8	418,4	420,1	421,7	423,4	425,1	426,8	228,5	430,2	431,9
85	433,6	435,3	437,0	438,7	440,5	442,2	443,9	445,7	447,4	439,2
86	450,9	452,6	454,4	456,2	458,0	459,7	461,5	463,3	465,1	466,9
87	468,7	470,5	472,3	474,1	476,0	477,8	479,7	481,5	483,4	485,2
88	487,1	489,0	490,9	492,7	494,6	496,5	498,4	500,3	502,3	504,2
89	506,1	508,0	510,0	511,9	513,9	515,9	517,8	519,8	521,8	522,8
90	525,76	527,76	529,77	531,78	533,80	535,82	537,86	539,90	541,95	544,00
91	546,05	548,11	550,18	552,26	554,35	556,44	558,53	560,64	562,75	564,87
92	566,99	569,12	571,26	573,40	575,55	577,71	579,87	582,04	584,22	586,41
93	588,60	590,80	593,00	595,21	597,43	599,66	601,89	604,13	606,38	608,64
94	610,90	613,17	615,44	617,72	620,01	622,31	624,61	626,92	629,24	631,57
95	633,90	636,24	638,59	640,94	643,30	645,67	648,05	650,43	652,82	655,22
96	657,62	660,03	662,45	664,88	667,31	669,75	672,20	674,66	677,12	679,59
97	682,07	684,55	687,04	689,54	692,05	694,57	697,10	699,63	702,17	704,71
98	707,27	709,83	712,40	714,98	717,56	720,15	722,75	725,63	727,98	730,61
99	733,24	735,88	738,53	741,18	743,85	746,52	749,20	751,89	754,58	757,29
100	760,00	762,72	765,45	768,19	770,93	773,68	776,44	779,22	782,00	784,78
101	787,57	790,37	793,18	796,00	798,82	801,66	804,50	807,35	810,21	813,08

b) Volumen und maximaler Wasserdampfgehalt von Gasen bei verschiedenen Temperaturen¹⁾.

Temperaturen °C	Volumen von trockenem Gas	Teilspannung des Wasserdampfes in gesättigtem Gase kg/m ³	Teilspannung des Gases kg/m ³	Aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstandenes Volumen m ³	Gramm Wasserdampf in 1 m ³ gesättigten Gases g	Gramm Wasserdampf in dem aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstandenen Volumen	Wärmeinhalt von trockenem Gas, entstanden aus 1 m ³ von 0°	Wärmeinhalt des Wasserdampfes in dem aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstandenen Volumen	Gesamtwärmeinhalt von gesättigtem Gas, entstanden aus 1 m ³ von 0°
0°	1,000	62	10271	1,006	4,9	4,93	0,0	2,93	2,93
1°	1,004	67	10266	1,010	5,1	5,15	0,36	3,06	3,42
2°	1,007	72	10261	1,014	5,6	5,68	0,72	3,38	4,10
3°	1,011	77	10256	1,018	6,0	6,11	1,08	3,64	4,72
4°	1,015	83	10250	1,023	6,4	6,55	1,44	3,91	5,35
5°	1,018	89	10244	1,027	6,8	6,98	1,80	4,17	5,97
6°	1,022	95	10238	1,031	7,3	7,52	2,16	4,49	6,65
7°	1,026	102	10231	1,036	7,8	8,08	2,52	4,83	7,35
8°	1,029	109	10224	1,041	8,3	8,64	2,88	5,17	8,05
9°	1,033	117	10216	1,045	8,9	9,30	3,24	5,57	8,81
10°	1,037	125	10208	1,049	9,4	9,86	3,60	5,91	9,51
11°	1,040	134	10199	1,054	10,1	10,65	3,96	6,39	10,35
12°	1,044	143	10190	1,058	10,7	11,32	4,32	6,80	11,12
13°	1,048	153	10180	1,063	11,4	12,12	4,68	7,29	11,97
14°	1,051	163	10170	1,068	12,1	12,92	5,04	7,77	12,81
15°	1,055	174	10159	1,073	12,9	13,84	5,40	8,33	13,73
16°	1,058	185	10148	1,078	13,7	14,77	5,76	8,90	14,66
17°	1,062	197	10136	1,083	14,5	15,70	6,12	9,47	15,59
18°	1,066	210	10123	1,088	15,4	16,76	6,48	10,11	16,59
19°	1,070	224	10109	1,093	16,4	17,93	6,84	10,83	17,67
20°	1,073	238	10095	1,098	17,4	19,10	7,20	11,54	18,74
21°	1,077	253	10080	1,103	18,4	20,30	7,56	12,27	19,83
22°	1,081	269	10064	1,109	19,5	21,63	7,92	13,09	21,01
23°	1,084	286	10047	1,115	20,6	22,97	8,28	13,92	22,20
24°	1,088	304	10029	1,120	21,8	24,42	8,64	14,81	23,45
25°	1,091	322	10011	1,126	23,1	26,00	9,00	15,77	24,77
26°	1,095	342	9991	1,133	24,4	27,65	9,36	16,78	26,14
27°	1,099	363	9970	1,139	25,8	29,30	9,72	17,80	27,52
28°	1,102	384	9949	1,145	27,3	31,26	10,08	19,01	29,09
29°	1,106	407	9926	1,151	28,8	33,15	10,44	20,17	30,61
30°	1,110	431	9902	1,158	30,4	35,20	10,80	21,44	32,24
31°	1,113	456	9877	1,165	32,1	37,40	11,16	22,80	33,96
32°	1,117	483	9850	1,172	33,9	39,73	11,52	24,24	35,76
33°	1,121	511	9822	1,179	35,7	42,10	11,88	25,70	37,58

¹⁾ Winter-Taschenbuch für Gaswerke 3, 572 (1928).

Temperaturen °C	Volumen von trockenem Gas	Teil- spannung des Wasser- dampfes in ge- sättigtem Gase kg/m ³	Teil- spannung des Gases kg/m ³	Aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstan- denes Volumen	Gramm Wasser- dampf in 1 m ³ ge- sättigten Gases	Gramm Wasser- dampf in dem aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstan- denen Volumen	Wärme- inhalt von trockenem Gas, ent- standen aus 1 m ³ von 0°	Wärme- inhalt des Wasser- dampfes in dem aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstan- denen Volumen	Gesamt- wärme- inhalt von ge- sättigtem Gas, ent- standen aus 1 m ³ von 0°
34°	1,125	541	9792	1,187	37,7	44,75	12,24	27,35	39,59
35°	1,128	572	9761	1,195	39,7	47,45	12,60	29,02	41,62
36°	1,132	604	9729	1,203	41,8	50,28	12,96	30,78	43,74
37°	1,135	638	9695	1,211	44,8	53,27	13,32	32,63	45,95
38°	1,139	673	9660	1,219	46,3	56,43	13,68	34,60	48,28
39°	1,143	711	9622	1,227	48,7	59,74	14,04	36,66	50,70
40°	1,146	750	9583	1,236	51,2	63,27	14,40	38,85	53,25
41°	1,150	791	9542	1,246	53,8	67,02	14,76	41,17	55,93
42°	1,154	834	9499	1,256	56,5	70,95	15,12	43,62	58,74
43°	1,157	878	9455	1,265	59,4	75,13	15,48	46,24	61,72
44°	1,161	925	9408	1,275	62,4	79,60	15,84	49,01	64,85
45°	1,165	974	9359	1,286	65,4	84,10	16,20	51,82	68,02
46°	1,168	1026	9307	1,297	68,7	89,12	16,56	54,94	71,50
47°	1,172	1079	9254	1,309	72,0	94,27	16,92	58,16	75,08
48°	1,176	1135	9198	1,322	75,5	99,80	17,28	61,64	78,92
49°	1,180	1194	9139	1,335	79,2	105,7	17,64	65,32	82,96
50°	1,183	1255	9078	1,348	83,0	111,8	18,00	69,14	87,14
51°	1,187	1318	9015	1,361	87,0	118,4	18,36	73,30	91,66
52°	1,190	1385	8948	1,375	91,0	125,2	18,72	77,54	96,26
53°	1,194	1455	8878	1,390	95,3	132,5	19,08	82,12	101,20
54°	1,198	1527	8806	1,406	99,7	140,1	19,44	86,86	106,30
55°	1,201	1602	8731	1,423	104,3	148,4	19,80	92,09	111,89
56°	1,205	1681	8652	1,440	109,1	157,1	20,16	97,53	117,69
57°	1,209	1762	8571	1,458	114,1	166,4	20,52	103,4	123,92
58°	1,212	1848	8485	1,477	119,2	176,2	20,88	109,5	130,38
59°	1,216	1936	8397	1,497	124,6	186,5	21,24	116,0	137,24
60°	1,220	2028	8305	1,518	130,1	197,5	21,60	122,9	144,50
61°	1,224	2124	8207	1,540	135,9	209,3	21,96	130,3	152,26
62°	1,227	2224	8109	1,563	141,9	221,8	22,32	138,3	160,32
63°	1,231	2328	8005	1,588	148,1	235,2	22,68	146,7	169,38
64°	1,235	2435	7898	1,615	154,5	249,5	23,04	155,7	178,74
65°	1,238	2547	7786	1,644	161,1	264,9	23,40	165,5	188,90
66°	1,242	2664	7669	1,674	168,1	281,8	23,76	176,1	200,86
67°	1,245	2785	7548	1,705	175,1	298,6	24,12	186,8	210,92
68°	1,249	2910	7423	1,740	182,5	317,6	24,48	198,8	223,28
69°	1,253	3040	7293	1,776	190,1	337,6	24,84	211,5	236,34
70°	1,256	3175	7158	1,814	198,0	359,0	25,20	225,1	250,30

Temperaturen °C	Volumen von trockenem Gas	Teil- spannung des Wasser- dampfes in ge- sättigtem Gase kg/m ²	Teil- spannung des Gases kg/m ²	Aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstan- denes Volumen m ³	Gramm Wasser- dampf in 1 m ³ ge- sättigten Gases g	Gramm Wasser- dampf in dem aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstan- denen Volumen	Wärme- inhalt von trockenem Gas, ent- standen aus 1 m ³ von 0°	Wärme- inhalt des Wasser- dampfes in dem aus 1 m ³ von 0° durch Sättigung entstan- denen Volumen	Gesamt- wärme- inhalt von ge- sättigtem Gas, ent- standen aus 1 m ³ von 0°
71°	1,260	3315	7018	1,856	206,2	382,7	25,56	240,1	265,66
72°	1,264	3460	6873	1,901	214,7	408,2	25,92	256,2	282,12
73°	1,267	3611	6722	1,948	223,3	435,0	26,28	273,3	299,58
74°	1,271	3768	6565	2,001	232,5	465,1	26,64	292,4	319,04
75°	1,275	3929	6404	2,058	241,9	498,0	27,00	313,3	340,30
76°	1,278	4097	6236	2,118	251,4	532,7	27,36	335,4	362,76
77°	1,282	4269	6064	2,186	261,4	571,3	27,72	359,9	387,2
78°	1,286	4449	5884	2,259	271,8	614,0	28,08	387,2	415,28
79°	1,290	4635	5698	2,340	282,4	661,0	28,44	417,0	445,44
80°	1,293	4828	5505	2,429	293,3	712,5	28,80	449,7	478,50
81°	1,297	5027	5306	2,527	304,6	769,9	29,16	486,4	515,56
82°	1,300	5233	5100	2,634	316,2	832,8	29,52	526,5	556,02
83°	1,304	5445	4888	2,758	328,4	905,6	29,88	572,8	602,68
84°	1,308	5666	4667	2,898	340,8	987,2	30,24	624,8	655,04
85°	1,311	5894	4439	3,053	353,7	1079	30,60	683,9	714,50
86°	1,315	6129	4204	3,243	366,8	1186	30,96	751,9	782,86
87°	1,319	6371	3962	3,441	380,4	1308	31,32	830,0	861,32
88°	1,322	6623	3710	3,684	394,4	1453	31,68	922,4	954,08
89°	1,326	6881	3452	3,970	408,7	1623	32,04	1031	1063,0
90°	1,330	7149	3184	4,317	423,6	1828	32,40	1162	1194,4
91°	1,333	7425	2908	4,739	438,9	2079	32,76	1322	1354,8
92°	1,337	7710	2623	5,270	454,7	2396	33,12	1525	1558,1
93°	1,340	8004	2329	5,948	470,9	2801	33,48	1783	1816,5
94°	1,344	8307	2026	6,860	487,7	3345	33,84	2131	2164,8
95°	1,348	8620	1713	8,132	505,1	4106	34,20	2618	2652,2
96°	1,352	8942	1391	10,050	522,6	5253	34,56	3352	3386,6
97°	1,355	9274	1059	13,270	540,6	7173	34,92	4580	4614,9
98°	1,359	9617	716	19,610	559,3	10970	35,28	7010	7045,3
99°	1,363	9970	363	38,830	578,7	22460	35,64	14360	14395,6
100°	1,366	10339	0		598,7		36,0		

b) Sättigungsdruck des Wasserdampfes
in mm Hg von — 19 bis 100° C¹⁾.

t° C	Ganze Grade									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
— 10	1,95	1,78	1,63	1,49	1,36	1,24	1,13	1,03	0,94	0,85
— 0	4,58	4,22	3,88	3,57	3,28	3,01	2,76	2,53	2,32	2,13
+ 0	4,58	4,93	5,29	5,69	6,10	6,54	7,01	7,51	8,05	8,61
10	9,21	9,84	10,52	11,23	11,99	12,79	13,63	14,53	15,48	16,48
20	17,54	18,65	19,83	21,07	22,38	23,76	25,21	26,74	28,35	30,04
30	31,82	33,70	35,66	37,73	39,90	42,18	44,56	47,07	49,69	52,44
40	55,32	58,34	61,50	64,80	68,26	71,88	75,65	79,60	83,71	88,02
50	92,51	97,20	102,1	107,2	112,5	118,0	123,8	129,8	136,1	142,6
60	149,4	156,4	163,8	171,4	179,3	187,5	196,1	205,0	214,2	223,7
70	233,7	243,9	254,6	265,7	277,2	289,1	301,4	314,1	327,3	341,0
80	355,1	369,7	384,9	400,6	416,8	433,6	450,9	468,7	487,1	506,1
90	525,8	546,1	567,0	588,6	610,9	633,9	657,6	682,1	707,3	733,2
100	760,0	787,6	815,9	845,1	875,1	906,1	937,9	970,6	1004,4	1038,9

¹⁾ Die Werte von — 0 bis — 19° beziehen sich auf Eis als Bodenkörper.

c) Eigenschaften des Wassers und Wasserdampfes
im Sättigungszustand¹⁾.

Temp. °C	Druck kg/cm ²	Spezifisches Volumen		Wärmeinhalt	
		Flüssigkeit cm ³ /g	Dampf cm ³ /g	Flüssigkeit ITcal/g	Dampf ITcal/g
0	0,006228	1,00021	206310	0	597,3
10	0,012513	1,00035	106410	10,04	601,6
20	0,023829	1,00184	57824	20,03	605,9
30	0,043254	1,00442	32922	30,00	610,2
40	0,075204	1,00789	19543	39,98	614,5
50	0,12578	1,0121	12045	49,95	618,9
60	0,20312	1,0171	7678,3	59,94	623,1
70	0,31775	1,0228	5046,3	69,93	627,3
80	0,48292	1,0290	3409,2	79,95	631,4
90	0,71491	1,0359	2361,5	89,98	635,3
100	1,03323	1,0435	1673,2	100,04	639,1
110	1,4609	1,0515	1210,1	110,12	642,7
120	2,0245	1,0603	891,65	120,25	646,2
130	2,7544	1,0697	668,21	130,42	649,6
140	3,6848	1,0798	508,53	140,64	652,7
150	4,8535	1,0906	392,46	150,92	655,7
160	6,3023	1,1021	306,76	161,26	658,5
170	8,0764	1,1144	242,55	171,68	661,0
180	10,225	1,1275	193,80	182,18	663,3
190	12,800	1,1415	156,32	192,78	665,2
200	15,857	1,1565	127,18	203,49	666,8

¹⁾ Nach den Beschlüssen der 3. Internationalen Dampftafel-Konferenz Washington 1935.

Temp. °C	Druck kg/cm ²	Spezifisches Volumen		Wärmeinhalt	
		Flüssigkeit cm ³ /g	Dampf cm ³ /g	Flüssigkeit ITcal/g	Dampf ITcal/g
210	19,456	1,1726	104,24	214,32	668,0
220	23,659	1,1900	86,070	225,29	669,0
230	28,531	1,2087	71,483	236,41	669,4
240	34,140	1,2291	59,684	247,72	669,4
250	40,560	1,2512	50,061	259,23	668,9
260	47,866	1,2755	42,149	270,97	667,8
270	56,137	1,3023	35,593	282,98	666,0
280	65,457	1,3321	30,122	295,30	663,6
290	75,917	1,3655	25,522	307,99	660,4
300	87,611	1,4036	21,625	320,98	656,1
310	100,64	1,4475	18,300	334,63	650,8
320	115,12	1,4992	15,438	349,00	644,2
330	131,18	1,5619	12,952	364,23	636,0
340	148,96	1,6408	10,764	380,69	625,6
350	168,63	1,7468	8,802	398,9	611,9
360	190,42	1,9066	6,963	420,8	592,9
370	214,68	2,231	4,997	452,3	559,3
371	217,26	2,297	4,761	457,2	553,8
372	219,88	2,381	4,498	462,9	547,1
373	222,53	2,502	4,182	471,0	538,9
374	225,22	2,79	3,648	488,0	523,3

g) Sättigungsdruck des Wasserdampfes über verdünnter Schwefelsäure (in Torr).

H ₂ SO ₄ %	Temperatur °C			
	0	20	25	30
0	4,58	17,54	23,76	31,82
10	4,40	17,01	22,81	30,87
20	4,03	15,26	20,91	28,00
30	3,39	13,16	17,82	23,55
40	2,56	9,65	15,92	18,46
50	1,51	5,96	8,55	12,69
60	0,64	2,81	4,04	5,73
70	0,092	0,70	0,95	1,59

h) Sättigungsdruck des Wasserdampfes (Torr) über Kochsalzlösungen (Konzentration in g, wasserfreie Substanz/100 g Lösung).

Konzentration %	Natriumchlorid		
	0°	20°	30°
0	4,58	17,54	31,82
5	4,40	17,01	30,55
10	4,31	15,79	29,59
15	4,12	15,61	28,32
20	3,85	14,56	26,41
25	3,48	13,33	24,50

f) Wärmehalt des Wassers und des überhitzten Dampfes in IT cal/g¹).

Druck kg/cm ²	Temperatur in °C												
	0°	50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	450°	500°	550°	
1	0,023	49,97	639,2	663,2	686,5	710,1	734,0	758,0	782,4	807,2	832,3	857,8	
5	0,120	50,05	100,11	130,92	681,9	706,7	731,5	756,1	780,8	805,9	831,3	856,9	
10	0,240	50,15	100,20	151,00	675,1	702,1	728,0	753,5	778,9	804,5	830,1	855,9	
25	0,599	50,45	100,46	151,21	203,6	687,8	718,0	746,3	773,3	800,0	826,5	852,6	
50	1,20	50,95	100,90	151,58	203,8	259,2	698,4	732,9	763,1	791,6	819,9	847,3	
75	1,79	51,46	101,34	151,95	204,1	259,2	672,6	717,6	752,1	783,2	813,1	841,8	
100	2,39	51,96	101,78	152,32	204,3	259,2	320,5	699,5	740,0	774,5	806,0	836,1	
125	2,98	52,46	102,22	152,69	204,6	259,3	319,9	676,7	726,9	765,2	799,1	830,3	
150	3,57	52,96	102,65	153,06	204,8	259,3	319,3	646,8	712,1	755,3	791,8	824,4	
200	4,74	53,96	103,57	153,82	205,2	259,4	318,4	393,1	676,5	733,4	776,0	812,0	
250	5,90	54,96	104,46	154,57	205,8	259,5	317,6	387,6	692,5	707,5	758,8	798,9	
300	7,05	55,96	105,35	155,33	206,2	259,7	317,0	384,0	524,5	677,5	739,7	—	

← Wasser → Überhitzter Dampf

¹⁾ Nach den Beschlüssen der 3. Internationalen Dampftafel-Konferenz Washington 1935.

e) Dampfspeicherung).
 Gewinnbare Dampfmenge in kg je m³ Heißwasser für verschiedene Anfangs- und Enddampfdrucke.

Enddampfdruck	Anfangsdampfdruck at																													
	17,0	16,0	15,0	14,5	14,0	13,5	13,0	12,5	12,0	11,5	11,0	10,5	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	
1,5	147	142,5	140	138	135,5	133	130,5	128	125	122,5	119	115,5	112	108,5	104,5	100,5	97	92	87,5	82,5	77	71,0	65	57,5	49	40	28	15,5		
2,0	138	134	130	127,8	125,2	123	120,4	118	115	112	109	105,5	102	98,8	95	92	87	82,5	78	74	68	62,5	56,5	50	43	34	25	13,5	—	
2,5	128	124	119,5	117,5	115	112,3	109,5	107	104	101	98	94,3	91	87,5	84	80	75,5	71,5	67,5	62	56,5	50	44,5	38	30	22	12	—	—	
3,0	119	115	110,6	108,2	105,8	103	100,2	97,5	94,2	91,2	87,7	84,5	80	75,5	72,5	69,5	65,2	60,5	55,0	50,6	45	39,5	33,5	26,5	19	10,5	—	—	—	
3,5	111	106,5	101,6	99	96,6	94	91,2	88,5	85,5	82,5	79,2	76	72,5	68,5	64,5	60	55,7	51	46,0	41	35,5	30	23,6	17	9,5	—	—	—	—	—
4,0	103,5	98	94,3	92	89,2	86,8	83,9	81	77,5	74,4	71	67,5	64	60,5	56,6	52	48	43	38	33	27,5	21,5	15	7,8	—	—	—	—	—	—
4,5	97	92,6	87,7	85,2	82,5	79,8	76,8	74	71	68	64,2	61	57,2	53,5	49,2	45	40,6	36	31	25,5	20	13,8	7,5	—	—	—	—	—	—	—
5,0	91	86,7	80,7	79,2	77	74	71	68	64,2	61	57,8	54	50,5	46,7	42,5	38,2	33,5	28	24	18,5	12,5	7	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5	85,5	80,7	75,7	73	70,5	67,6	64,8	61,6	58,5	54,9	51,3	47,5	44	40	36	32	27,5	22,7	17,7	12	6,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,0	80	75,5	70,5	68	65	62	59	56	52,5	49	45,6	42	38,5	34,5	30,6	26,5	21	16,2	11	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,5	75,2	70,5	65,5	62,5	59,8	56,9	53,8	50,8	47,5	44	40,9	37,2	33,5	30	26	21	16,2	11	5,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,0	69,0	65	59,6	57	54,2	51,5	48,2	45	41,7	38,4	34,9	31,2	27,5	23,5	19,5	15	10,5	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,5	65	60,3	55,0	52,4	49,6	46,6	43,0	41	37,5	34	30,7	27,1	23,2	19	15	10	5,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,0	61	56	50,8	48	45,3	42,5	39,5	36,5	33,2	30	26,5	22,6	18,5	14,5	10	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,5	56,5	51,8	46,2	43,6	40,8	38	35	32	28,8	25,5	21,6	17,6	13,5	9,5	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9,0	52	47	41,6	39	36	33	30	27	23,8	20,5	16,8	12,5	8,5	4,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9,5	48	43	37,7	35	32	29	26	23	20,8	18	14	10	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10,0	44	39,3	34	31	28	25	22	19,5	16,8	14,8	11	7,7	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10,5	40	35,6	30,5	27,5	24,5	21,5	18,3	14,8	11	7,7	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,0	36	32	27	24	21	18	14,5	11	7	3,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,5	33,5	28,7	23,4	20,5	17,5	14,5	10,8	7,8	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,0	30,5	25,4	19,8	17	14	11	7	4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	27	22	16,4	13,5	10,5	7,3	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13,0	23,5	18,5	13	10	7	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	20,5	15,2	9,7	6,5	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	17,5	12	6,4	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	14,8	9,3	3,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,0	12,0	5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*) Rotkohlensaubuch 1922, S. 13.

i) Teildruck von Ammoniak über wässrigen Ammoniaklösungen (Torr).

Temp. °C	Ammoniakgehalt der Lösung in Gew.-%													
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	22
0	7	8	10	12,5	15	18	21,5	29,5	38,5	48,5	59	71	86,5	106
5	8	10	12,5	16	19	23	27,5	37	47,5	60	75	91	110	140
10	10	12,5	16	20,5	25	30	35,5	48	62	77,5	97	118	142	176
15	12	15,5	21	26	32,5	39	45,5	61	81	100	124	150	183	218
20	15	20	20,5	33,5	41	49,5	58,5	78	103	128	156	188	229	270
25	19,5	26	34	42,5	51,5	64	75	99	131	161	195	234	283	—
30	24,5	33	42,5	53	67	81	95	124	162	200	246	295	356	—
40	31	40	65	83	103	124	146	193	244	302	368	455	—	—
50	46	70	95	122	151	181	215	284	360	440	550	—	—	—

k) Sättigungsdrucke verschiedener Stoffe (Torr).

Temp. °C	n-Pentan	n-Hexan	n-Oktan	Benzol	Toluol	o-Xylol	Tetralin	Motoren- benzol ¹⁾
— 20	68,8	14,1	—	5,8	1,8	—	—	3,6
— 10	114,3	25,9	—	14,8	3,6	2,2	—	9,1
0	183,2	45,5	2,9	26,5	9,9	4,0	0,08	16,5
10	281,8	75,0	5,6	45,4	18,0	6,4	0,17	28,6
20	420,2	120,0	10,5	74,7	26,5	10,1	0,27	47,5
30	610,9	186,1	18,4	118,2	39,0	15,6	—	77,0
40	873	276,7	30,9	181,1	63,0	23,7	—	115,7
50	1193	400,6	49,4	269,0	97,0	35,5	—	—
60	1605	568,0	77,6	388,6	145,5	52,4	—	—
70	2119	787,0	117,9	547,4	210,0	76,2	—	—
80	2735	1062	174,8	753,6	292	108,9	—	—
90	—	1407	253,4	1016	405	153,5	—	—
100	—	1836	353,6	1344	563	213,1	26	—
110	—	2358	481,9	1748	752	—	40	—
120	—	2982	646,4	2238	—	393,9	59	—

¹⁾ Mittelwerte.

Temp. °C	Methanol	Äthyl- alkohol	Äthyl- äther	Tetrachlor- kohlenstoff	Schwefel- kohlenstoff	Temp. °C	Schwefel	Queck- silber
— 20	6,3	3,3	63	9,9	47,3	0	—	0,00021
— 10	13,5	6,5	111,8	18,9	79,4	20	—	0,0013
0	26,8	12,2	184,9	33,1	127,9	40	—	0,0065
10	50,1	23,8	291,8	55,7	198,5	60	0,00026	0,027
20	88,7	44,0	442,4	89,6	298,0	80	0,00088	0,096
30	150,0	78,1	647,9	139,6	434,6	100	0,0075	0,28
40	243,5	133,4	921,2	210,9	617,5	120	0,030	0,80
50	381,7	219,8	1276,1	309,0	857,1	140	0,11	1,85
60	579,9	350,2	1728	439,0	1164,5	160	0,33	4,18
70	857,1	540,9	2294	613,8	1552	180	0,89	8,56
80	1238,5	811,8	2991	843,3	2032	200	2,12	17,22

l) Sättigungsdruck des Benzols und Benzolgehaltes des Gases.

Temp. °C	Dampfdruck Torr	Vol.-%	g/Nm³	Temp. °C	Dampfdruck Torr	Vol.-%	g/Nm³
-20	5,8	0,76	26,6	15	59,2	7,79	271,4
-15	10,2	1,34	46,8	20	74,7	9,83	342,5
-10	14,8	1,95	67,9	30	118,2	15,55	541,9
-5	20,2	2,66	92,6	40	181,1	23,83	830,3
0	26,5	3,49	121,5	50	269,0	35,40	1233
+5	34,2	4,50	156,8	60	388,6	51,13	1782
10	45,4	5,97	208,1				

m) Sättigungsdruck des Naphthalins und Naphthalin-gehaltes des Gases.

Temp. °C	Dampfdruck Torr	g/100 m³	Temp. °C	Dampfdruck Torr	g/100 m³	Temp. °C	Dampfdruck Torr	g/100 m³
0	0,006	4,51	30	0,133	90,10	80	7,4	4301,5
5	0,010	7,38	35	0,210	139,96	90	12,6	7122,2
10	0,021	15,23	40	0,320	209,88	100	18,5	10174
15	0,035	24,95	50	0,815	517,94	110	27,3	14624
20	0,054	37,83	60	1,83	1127,8	120	40,2	20386
25	0,082	56,48	70	3,95	2363,2	130	61,9	31514

Sättigungsdruck des Naphtalins von -36 bis +30° C.
(Nach M. R. Andrews, Journ. physic. Chem. 30, 1497, 1927.)

$$\log p = 12,275 - \frac{4000}{T}$$

n) Dampfdruck verflüssigter Gase in at.

Temp. °C	Aze-tylen	Äthy-len	Äthan	Propan	n-Butan	i-Butan	Kohlen-dioxyd	Methyl-chlorid	Ammo-niak	Schwefel-dioxyd	Schwefel-wasser-stoff
-30	11,0	18,7	10,5	1,85	245 mm	345 mm	14,1	0,76	1,13	0,36	—
-25	12,5	21,0	12,2	2,2	300 »	415 »	16,1	0,95	1,45	0,55	4,93
-20	14,7	24,1	14,0	2,6	370 »	520 »	18,8	1,16	1,83	0,61	5,84
-15	17,2	27,5	16,0	3,05	440 »	640 »	22,2	1,42	2,28	0,76	6,84
-10	20,0	31,3	18,2	3,6	540 »	1,03 at	25,7	1,72	2,82	1,00	8,00
-5	23,1	35,5	20,7	4,2	635 »	1,25 »	34,4	2,08	3,45	1,25	9,30
0	26,3	40,2	23,4	4,8	755 »	1,5 »	39,2	2,49	4,19	1,51	10,8
5	30,0	45,0	25,7	5,6	1,18 at	1,8 »	44,4	2,96	5,00	1,90	12,5
10	33,7	50,2	28,8	6,4	1,42 »	2,1 »	50,2	3,51	6,02	2,35	14,3
15	38,1	—	32,3	7,3	1,80 »	2,5 »	56,5	4,12	7,12	2,78	16,5
20	43	—	36,2	8,3	2,15 »	2,9 »	63,4	4,83	8,40	3,30	18,6
25	48	—	40,6	9,3	2,62 »	3,3 »	70,7	5,62	9,80	3,80	21,1
30	54	—	45,3	10,4	3,25 »	3,8 »	—	6,50	11,44	4,60	23,7
40	—	—	—	12,8	4,20 »	4,9 »	—	8,75	15,29	6,20	29,7
50	—	—	—	15,6	5,45 »	6,4 »	—	11,20	19,98	8,30	36,6
60	—	—	—	18,9	6,85 »	8,2 »	—	14,30	25,8	11,09	44,4

o) Höchstzulässige Füllung von Stahlflaschen mit verdichteten und verflüssigten Gasen.
(Druckgasverordnung von Preußen vom 2. 12. 1935.)

Gasart	Fassungsraum l/kg verfl. Gas	Gasart	Fassungsraum l/kg verfl. Gas
Ammoniak (verfl.)	1,86	Äthan	3,3
» (gelöst)	1,25—1,30	Propan	2,35
Kohlendioxyd	1,34	Butan	2,05
Schwefeldioxyd	0,8	Äthylen	3,5
Schwefelwasserstoff	1,45	Propylen	2,25
Chlorwasserstoff	1,50	Butadien	1,85
Chlor	0,8	Ölgas, Ruhrgasol	2,5
Methyl- und Äthylamin	1,7	Chlormethyl, Chloräthyl	1,25

p) Zulässiger Höchstdruck für verdichtete Gase bei 15° C.

Azetylen (gelöst)	15 atü	Permanente Gase (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Edelgase, Preßluft, Kohlenoxyd, Methan, Wassergas, Stadtgas)	200 atü
» (verdichtet)	1,5 »		
Ölgas	125 »		
Mischgas von Azetylen und Ölgas	10 »		

q) Notwendiger Prüfdruck von Behältern für verflüssigte Gase.

Gasart	Prüfdruck	Gasart	Prüfdruck
Ammoniak (verfl.)	30 at	Äthan	95 at
» (gelöst) < 40%	4 »	Propan	25 »
» < 50%	9 »	Butan	12 »
Kohlendioxyd	190 »	Äthylen	225 »
Schwefeldioxyd	12 »	Propylen	35 »
Schwefelwasserstoff	45 »	Butadien	10 »
Chlorwasserstoff	100 »	Ölgas (Blaugas)	190 »
Chlor	22 »	Ruhrgasol	45 »
Methylamin	14 »	Chlormethyl	16 »
Äthylamin	10 »	Chloräthyl	10 »

Für permanente Gase beträgt der Prüfdruck bei gewöhnlichen Stahlflaschen 225 at, bei Leichtstahlflaschen 300 at.

r) Nutzinhalt von Stahlflaschen für verdichtete und verflüssigte Gase.

Gas	Betriebsdruck at	Rauminhalt l	Leergewicht kg	Gasinhalt entspannt m ³	Flaschengewicht	
					¹⁾ kg/m ³ Gas bzw. ²⁾ kg/kg Gas	kg 1000 kcal
Wasserstoff	150	40	75	6	12,5 ¹⁾	4,1
Stadtgas (alte Flasche)	150	40	75	6	12,5 ¹⁾	3
» (Leichtflasche)	200	50	54	10	5,4 ¹⁾	1,3
Methan	150	40	75	6	12,5 ¹⁾	1,3
Azetylen (gelöst)	15	40	78	5,5	14,2 ¹⁾	1,0
Propan (Deurag)	25	52	30	22,1 kg	1,36 ²⁾	0,28
Propan (I.G.)	(Probedruck) 25	30	28	15 »	1,86 ²⁾	0,38
» »	(Probedruck)	75	50	30 »	1,67 ²⁾	0,35
Butan (Frankreich)	—	—	12	13 »	0,93 ²⁾	0,13
Ruhrgasöl	65 (Probedruck)	75	55	45 »	1,22 ²⁾	0,11

Maße von Leicht-Stahlflaschen für die Ausrüstung von Kraftwagen mit Antrieb durch Stadtgas, Klärgas und andere hochverdichtete Gase.

(Auszug aus DIN-Entwurf Kr. 3380.)

Rauminhalt l ≈	Außendurchmesser mm	Länge ¹⁾ mm ≈	Wanddicke mm	Leergewicht kg ≈
53	229	1610	5,75	62
110	321	1720	8,0	136
150	368	1800	9,25	192
230	394	2400	10,0	281

¹⁾ Die Flasche einschließlich Ventil ist etwa 100 mm länger.

Werkstoff: Flußstahl von 90 bis 105 kg/mm² Festigkeit, 77 kg/mm² Mindestdruckgrenze und 14% Mindestbruchdehnung (δ_5).

s) Festgelegter Farbanstrich für Stahlflaschen.

Sauerstoff	blau	sonstige brennbare Gase	rot
Stickstoff	grün	sonstige nichtbrennbare Gase	grau
Azetylen	gelb		

Zur äußeren Kennzeichnung ihres Inhalts genügt bei einem grauen Grundanstrich auch ein ausreichend breiter Farbring in der vorgeschriebenen Kennfarbe an einer gut sichtbaren Stelle des Behälters.

13. Spezifische Wärme.

a) Begriff.

Die spezifische Wärme eines Stoffes ist eine unbenannte Zahl, die angibt, wievielmals mehr Wärme dieser bei der Temperatur t zur Erwärmung um 1°C benötigt als die gleiche Gewichtsmenge Wasser bei 15°C . Die Angabe der spezifischen Wärme c erfolgt zumeist je Gewichts- oder Volumeneinheit (kcal/kg , $^\circ\text{C}$, kcal/Nm^3 , $^\circ\text{C}$) oder auch als molare spezifische Wärme C (kcal/kmol $^\circ\text{C}$).

Spezifische Wärme bei konstantem Druck c_p und bei konstantem Volumen c_v . Wenn einem Stoff Wärme zugeführt wird, so wird im allgemeinen nicht die gesamte Wärmemenge dazu verwendet, um dessen Temperatur zu erhöhen, sondern ein Teil derselben wird zu seiner räumlichen Ausdehnung verbraucht, wobei gegen den äußeren Druck Arbeit geleistet wird. Nur bei Erwärmung unter konstantem Volumen fällt dieser Arbeitsverbrauch fort. Man muß daher zwischen der spezifischen Wärme bei konstantem Druck c_p und bei konstantem Volumen c_v unterscheiden, wobei stets $c_p > c_v$ ist. Bei festen und flüssigen Stoffen ist die Wärmeausdehnung so gering, daß zwischen c_p und c_v praktisch kein Unterschied besteht. Bei allen idealen und realen Gasen beträgt dagegen die Ausdehnung je Grad $1/273$ des Volumens bei 0° (vgl. S. 81). Die äußere Ausdehnungsarbeit ergibt sich daher für 1 Mol je Grad zu $p \cdot v/273 = R$ und damit zu $C_p - C_v = R = 1,987 \text{ kcal/Mol}$.

Nach der kinetischen Theorie der Materie ist die spezifische Wärme idealer Gase bei konstantem Volumen abhängig von der Zahl der Freiheitsgrade, wobei jeder derselben den Energiebetrag $\frac{1}{2} k T = \frac{1}{2} \frac{R}{N} T$ aufnimmt ($R =$ Gaskonstante, $T =$ absolute Temperatur und $N =$ Molekülzahl im Mol). Bei einatomigen Gasen ist jedes Atom nach sämtlichen drei Koordinatenrichtungen frei beweglich. Da die molare spezifische Wärme bei konstantem Volumen C_v für jeden Freiheitsgrad somit $\frac{1}{2} R$ beträgt, folgt für einatomige Gase $C_v = \frac{3}{2} R$. Bei zweiatomigen Gasen kommen außer diesen drei Bewegungsmöglichkeiten noch zwei Rotationsbewegungen um die beiden Achsen, die senkrecht auf seiner Symmetrieachse stehen, hinzu, so daß zweiatomige Gase insgesamt fünf Freiheitsgrade aufweisen. Bei diesen gilt somit $C_v = \frac{5}{2} R$. Bei einem Gas mit mehr als zwei Atomen im Molekül ist dessen Lage im Raum neben den drei Schwerpunktskoordinaten eindeutig erst durch die drei Winkel entsprechend der Rotation um die drei Achsen bestimmt. Es weist also sechs Freiheitsgrade auf und somit gilt $C_v = \frac{6}{2} R$.

Verhältnis von C_p/C_v . Aus der kinetischen Theorie der Materie ergibt sich ferner, daß, wenn sämtliche dem Gasmolekül zugeführte Energie nur für die Wärmebewegung der Moleküle verbraucht wird, das Verhältnis C_p/C_v einen Höchstwert $5/3 = 1,667$ annimmt. (Dies gilt mit großer Annäherung für einatomige Gase. Bei zweiatomigen idealen Gasen beträgt C_p/C_v 1,40, bei mehratomigen Gasen 1,34.

Die spezifischen Wärmen sind ferner abhängig von der Temperatur und dem Druck. Man hat daher zwischen der wahren spezifischen Wärme c bei einer gegebenen Temperatur und der mittleren spezifischen Wärme c_m , die das Mittel der spezifischen Wärmen zwischen einer bestimmten Temperatur und einer Bezugstemperatur (zumeist 0° C) darstellt, zu unterscheiden (vgl. die Zahlentafeln auf S. 66 und 68). In diesen Zahlentafeln¹⁾ sind die wahren und mittleren spezifischen Wärmen sämtlicher technisch wichtiger Gase je Nm³ bei konstantem Druck für $p = 0$ at abs zusammengestellt. Die Unterschiede in den spezifischen Wärmen bei $p = 0$ at abs und $p = 1$ at abs sind bei den zweiatomigen Gasen so gering, daß sie vernachlässigt werden können. Bei den mehratomigen Gasen und Dämpfen, wie Methan, Kohlendioxyd und Wasserdampf liegen deren Teildrucke in den praktisch vorkommenden Fällen im allgemeinen näher bei 0 als bei 1 at abs, so daß auch bei diesen Gasen diese Zahlentafeln mit genügender Genauigkeit Anwendung finden können.

Für die Umrechnung der spezifischen Wärmen c_p vom Druck $p = 0$ at abs. auf den Druck von 760 Torr gilt nach Eucken²⁾ die Beziehung

$$c_p = c_{p_0} - A \cdot T \int_0^p \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_p \cdot dp \dots \dots \dots (1)$$

Mit ausreichender Genauigkeit kann man jedoch auch die einfache Zustandsgleichung in der Form

$$p \cdot V = R \cdot T + B \cdot p \dots \dots \dots (2a)$$

in der

$$B = b - \frac{a}{R \cdot T^x} \dots \dots \dots (2b)$$

bedeutet, zugrunde legen. Man erhält daraus

$$c_p = c_{p_0} - T \frac{d^2 B}{d T^2} \cdot p \dots \dots \dots (3)$$

Für die mittlere spezifische Wärme gilt entsprechend der Zuschlag

$$\Delta c_{p_m} = \frac{1}{t} \int_{273}^T \Delta c_p \cdot dT \dots \dots \dots (4)$$

1) GWF 78, 637 (1935).

2) »Grundriß der physikalischen Chemie«, Leipzig 1934, 4. Aufl., S. 99.

Der Einfluß eines mäßigen Druckes bei mittleren und hohen Temperaturen auf die Größe der spezifischen Wärme kann im allgemeinen vernachlässigt werden. Die Erhöhung derselben beträgt für den Übergang von 0 auf 1 at bei zweiatomigen Gasen nur etwa 0,1%, bei Kohlendioxyd 0,3%. Etwas höher ist sie bei Dämpfen und beziffert sich bei Wasserdampf für 270° beispielsweise auf ungefähr 2%.

Zuweilen ist es erwünscht, die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmen, vor allem der mittleren spezifischen Wärmen, wie beispielsweise für die Aufstellung von Näherungsformeln zur Berechnung der Grenztemperatur von Gasen in möglichst einfache Formeln zu fassen. Für Kohlendioxyd, Wasserdampf und Stickstoff gelten über einen größeren Temperaturbereich mit Abweichungen von nicht mehr als $\pm 0,7\%$ unter Zugrundelegung der in der nachfolgenden Zahlentafel angeführten Werte folgende Gleichungen:

a) Kohlendioxyd:

$$c_{p_{mCO_2}} = 0,487 + 0,000045 t \quad (1000-2200^\circ) \quad \dots \quad (5a)$$

$$c_{p_{mCO_2}} = 0,539 + 0,00002 t \quad (2000-3000^\circ) \quad \dots \quad (5b)$$

$$c_{p_{mCO_2}} = 0,639 - \frac{120}{t} \quad (1200-2200^\circ) \quad \dots \quad (5c)$$

$$c_{p_{mCO_2}} = 0,649 - \frac{140}{t} \quad (1600-3000^\circ) \quad \dots \quad (5d)$$

b) Wasserdampf:

$$c_{p_{mH_2O}} = 0,363 + 0,00005 t \quad (1200-2200^\circ) \quad \dots \quad (6a)$$

$$c_{p_{mH_2O}} = 0,382 + 0,00004 t \quad (1600-2800^\circ) \quad \dots \quad (6b)$$

$$c_{p_{mH_2O}} = 0,519 - \frac{120}{t} \quad (1200-2000^\circ) \quad \dots \quad (6c)$$

$$c_{p_{mH_2O}} = 0,561 - \frac{200}{t} \quad (1800-2800^\circ) \quad \dots \quad (6d)$$

c) Stickstoff:

$$c_{p_{mN_2}} = 0,313 + 0,00002 t \quad (1000-2400^\circ) \quad \dots \quad (7a)$$

$$c_{p_{mN_2}} = 0,334 + 0,00001 t \quad (1800-3000^\circ) \quad \dots \quad (7b)$$

$$c_{p_{mN_2}} = 0,373 - \frac{40}{t} \quad (1000-2200^\circ) \quad \dots \quad (7c)$$

$$c_{p_{mN_2}} = 0,389 - \frac{70}{t} \quad (1600-3000^\circ) \quad \dots \quad (7d)$$

b) Wahre spezifische Wärme c_p reiner Gase und Dämpfe in kcal/m³, °C bei verschiedenen Temperaturen t (°C) und konstantem Druck ($p = 0$ at abs)¹⁾ nach Justi.

t	H ₂	N ₂	CO	O ₂	H ₂ O	CO ₂	Luft
0	0,310	0,310	0,310	0,312	0,354	0,382	0,311
20	0,310	0,310	0,310	0,313	0,356	0,394	0,311
100	0,310	0,311	0,312	0,318	0,361	0,432	0,312
200	0,310	0,314	0,316	0,328	0,371	0,467	0,317
300	0,311	0,319	0,322	0,338	0,382	0,502	0,323
400	0,311	0,325	0,330	0,348	0,394	0,525	0,330
500	0,312	0,333	0,338	0,356	0,407	0,546	0,338
600	0,314	0,339	0,345	0,362	0,420	0,563	0,344
700	0,317	0,346	0,351	0,368	0,433	0,577	0,350
800	0,321	0,352	0,356	0,372	0,446	0,589	0,356
900	0,324	0,357	0,361	0,376	0,459	0,598	0,362
1000	0,328	0,361	0,365	0,379	0,471	0,606	0,365
1100	0,332	0,365	0,369	0,381	0,482	0,613	0,368
1200	0,336	0,369	0,372	0,383	0,493	0,619	0,372
1300	0,340	0,372	0,375	0,385	0,503	0,624	0,375
1400	0,344	0,374	0,377	0,387	0,512	0,628	0,376
1500	0,348	0,376	0,379	0,388	0,520	0,632	0,378
1600	0,351	0,378	0,381	0,389	0,527	0,635	0,380
1700	0,354	0,380	0,383	0,390	0,533	0,637	0,382
1800	0,357	0,382	0,384	0,391	0,539	0,639	0,384
1900	0,359	0,383	0,385	0,392	0,545	0,641	0,385
2000	0,361	0,384	0,386	0,392	0,551	0,643	0,386
2100	0,364	0,385	0,387	0,393	0,556	0,645	0,387
2200	0,366	0,386	0,388	0,393	0,560	0,647	0,388
2300	0,368	0,387	0,389	0,393	0,564	0,648	0,389
2400	0,369	0,388	0,389	0,394	0,567	0,649	0,389
2500	0,371	0,388	0,390	0,394	0,570	0,650	0,389
2600	0,373	0,389	0,390	0,394	0,573	0,651	0,390
2700	0,374	0,390	0,391	0,395	0,576	0,652	0,391
2800	0,376	0,390	0,391	0,395	0,578	0,653	0,391
2900	0,377	0,391	0,392	0,395	0,580	0,654	0,391
3000	0,378	0,392	0,392	0,395	0,582	0,654	0,392

t	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆ (Dampf)	NH ₃	H ₂ S	SO ₂
0	0,369	0,451	0,456	0,928	0,379	0,366	0,425
20	0,378	0,473	0,473	0,973	0,384	0,369	0,433
100	0,420	0,558	0,530	1,16	0,411	0,380	0,465
200	0,479	0,663	0,585	1,39	0,452	0,397	0,500
300	0,544	0,752	0,618	1,61	0,496	0,413	0,527
400	0,599	0,828	0,648	1,84	0,542	0,430	0,550
500	0,653	0,895	0,676	—	0,587	0,447	0,566
600	0,700	0,952	0,701	—	0,634	0,473	0,578
700	0,742	1,003	0,723	—	—	—	0,587
800	0,778	1,048	0,743	—	—	—	0,595

¹⁾ Die Unterschiede in den spez. Wärmen bei $p = 0$ at und $p = 1$ at abs sind bei den zweiatomigen Gasen so gering, daß sie vernachlässigt werden können, bei den mehratomigen Gasen liegen deren Teildrücke in den praktisch vorkommenden Fällen im allgemeinen näher bei 0 als bei 1 at abs.

Wahre molare spezifische Wärme reiner Gase und Dämpfe in kcal/Mol, °C bei verschiedenen Temperaturen t (°C) und konstantem Druck ($p = 0$ at abs)¹⁾.

t	H ₂	N ₂	CO	O ₂	H ₂ O	CO ₂	Luft
0	6,95	6,95	6,94	6,99	7,98	8,56	6,96
20	6,95	6,95	6,95	7,01	7,99	8,84	6,96
100	6,95	6,98	6,99	7,13	8,10	9,69	7,01
200	6,95	7,03	7,08	7,36	8,32	10,47	7,10
300	6,96	7,15	7,22	7,59	8,57	11,23	7,24
400	6,97	7,30	7,39	7,81	8,85	11,79	7,40
500	7,00	7,46	7,57	7,99	9,13	12,25	7,57
600	7,05	7,61	7,73	8,13	9,43	12,63	7,71
700	7,11	7,76	7,87	8,26	9,72	12,94	7,86
800	7,19	7,89	8,00	8,35	10,01	13,20	7,98
900	7,27	8,00	8,11	8,43	10,29	13,41	8,09
1000	7,36	8,10	8,20	8,50	10,56	13,60	8,18
1100	7,45	8,19	8,28	8,55	10,81	13,74	8,26
1200	7,54	8,27	8,35	8,60	11,04	13,87	8,34
1300	7,63	8,33	8,41	8,64	11,28	13,98	8,39
1400	7,71	8,39	8,46	8,67	11,46	14,07	8,45
1500	7,79	8,44	8,51	8,70	11,64	14,15	8,49
1600	7,86	8,48	8,55	8,72	11,80	14,22	8,53
1700	7,93	8,52	8,58	8,74	11,95	14,28	8,56
1800	7,99	8,56	8,61	8,76	12,09	14,33	8,60
1900	8,05	8,59	8,64	8,77	12,22	14,38	8,63
2000	8,10	8,61	8,66	8,79	12,34	14,42	8,65
2100	8,15	8,64	8,68	8,80	12,43	14,46	8,67
2200	8,20	8,66	8,70	8,81	12,53	14,49	8,69
2300	8,25	8,68	8,72	8,82	12,62	14,52	8,71
2400	8,28	8,70	8,73	8,83	12,69	14,54	8,73
2500	8,32	8,71	8,75	8,83	12,77	14,57	8,74
2600	8,36	8,73	8,76	8,84	12,83	14,59	8,75
2700	8,39	8,74	8,77	8,85	12,89	14,61	8,76
2800	8,42	8,75	8,78	8,85	12,95	14,63	8,77
2900	8,44	8,77	8,79	8,86	13,00	14,64	8,78
3000	8,47	8,78	8,80	8,86	13,05	14,66	8,79

¹⁾ C. folgt hieraus durch Subtraktion von 1,987.

c) Mittlere spezifische Wärme c_{pm} reiner Gase und Dämpfe
in kcal/m³, °C von 0 bis t °C bei konstantem Druck
($p = 0$ at abs)¹⁾ nach Justi.

t	H ₂	N ₂	CO	O ₂	H ₂ O	CO ₂	Luft
0	0,310	0,310	0,310	0,312	0,354	0,382	0,311
100	0,310	0,311	0,311	0,314	0,358	0,406	0,312
200	0,310	0,311	0,313	0,319	0,362	0,429	0,313
300	0,310	0,313	0,315	0,324	0,367	0,448	0,315
400	0,310	0,315	0,318	0,329	0,372	0,464	0,318
500	0,311	0,318	0,321	0,333	0,378	0,478	0,321
600	0,311	0,321	0,325	0,337	0,384	0,491	0,324
700	0,312	0,324	0,328	0,341	0,390	0,502	0,327
800	0,313	0,327	0,331	0,344	0,396	0,512	0,330
900	0,314	0,330	0,334	0,348	0,402	0,521	0,333
1000	0,315	0,333	0,337	0,350	0,409	0,530	0,336
1100	0,317	0,336	0,340	0,353	0,415	0,537	0,339
1200	0,318	0,338	0,342	0,355	0,421	0,543	0,341
1300	0,320	0,340	0,344	0,357	0,427	0,548	0,343
1400	0,321	0,343	0,346	0,359	0,432	0,553	0,346
1500	0,323	0,345	0,348	0,361	0,438	0,558	0,348
1600	0,325	0,347	0,350	0,363	0,443	0,563	0,350
1700	0,326	0,349	0,352	0,364	0,448	0,568	0,352
1800	0,328	0,351	0,354	0,366	0,453	0,572	0,354
1900	0,329	0,352	0,356	0,367	0,458	0,576	0,355
2000	0,331	0,354	0,357	0,368	0,462	0,579	0,357
2100	0,333	0,355	0,358	0,369	0,466	0,582	0,358
2200	0,334	0,356	0,359	0,370	0,470	0,585	0,359
2300	0,335	0,358	0,361	0,371	0,474	0,588	0,361
2400	0,337	0,359	0,362	0,372	0,478	0,590	0,362
2500	0,338	0,360	0,363	0,373	0,482	0,593	0,363
2600	0,339	0,361	0,365	0,374	0,485	0,595	0,364
2700	0,341	0,362	0,365	0,375	0,488	0,597	0,365
2800	0,342	0,363	0,366	0,375	0,491	0,598	0,366
2900	0,343	0,364	0,367	0,377	0,494	0,599	0,367
3000	0,344	0,365	0,368	0,378	0,497	0,600	0,368

t	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₆ H ₆ (Dampf)	NH ₃	H ₂ S	SO ₂
0	0,369	0,451	0,456	0,93	0,379	0,366	0,425
100	0,387	0,495	0,496	1,05	0,394	0,373	0,445
200	0,420	0,560	0,526	1,16	0,413	0,381	0,463
300	0,452	0,609	0,552	1,27	0,432	0,389	0,481
400	0,482	0,655	0,572	1,39	0,454	0,397	0,495
500	0,510	0,697	0,590	—	0,476	0,406	0,508
600	0,538	0,734	0,607	—	0,497	0,416	0,519
700	0,564	0,768	0,622	—	0,519	0,425	0,528
800	0,589	0,805	0,636	—	0,539	0,434	0,535

¹⁾ Bei den zweiatomigen Gasen sind die Werte für c_{pm} bei $p = 0$ at und $p = 1$ at abs praktisch gleich, bei H₂O und CO₂ ist zu berücksichtigen, daß bei wärmetechnischen Rechnungen deren Partialdruck zumeist näher bei $p = 0$ at abs liegt.

d) Wahre spezifische Wärme c_p
von Propan und Butan.
(kcal/m³, °C)

t	Propan	Butan
0	0,81	1,03
50	0,88	1,11
75	0,91	1,15

$$C_p = 4,4 + 4,4 n + (0,012 + 0,006 n) t.$$

C_p = molare spezifische Wärme bei konstantem Druck,
 n = Zahl der Kohlenstoffatome im Molekül,
 t = Temperatur °C.

e) Mittlere spezifische Wärme c_{pm} technischer Gase
in kcal/m³, °C von 0 bis t °C bei konstantem Druck
($p = 0$ at abs)

t	Steinkohlengas	Stadtgas	Wassergas	Generatorgas
0	0,339	0,327	0,314	0,334
100	0,350	0,335	0,316	0,342
200	0,362	0,343	0,318	0,350
300	0,374	0,351	0,320	0,357
400	0,386	0,359	0,322	0,363
500	0,398	0,367	0,325	0,370
600	0,409	0,375	0,328	0,376
700	—	—	0,330	0,381
800	—	—	0,333	0,386
900	—	—	0,336	0,391
1000	—	—	0,338	0,396
1100	—	—	0,340	0,400
1200	—	—	0,342	0,403

h) Spezifische Wärme von Wasser nach Dieterici
(kcal/kg, °C).

0 °C	1,0088	80	1,0045	160	1,0361	240	1,0942
20	0,9987	100	1,0099	180	1,0482	260	1,1129
40	0,9987	120	1,0170	200	1,0619	280	1,1333
60	1,0008	140	1,0257	220	1,0772	300	1,1543

Für den Temperaturbereich von 35—300° gilt die Formel:

$$c = 0,99827 - 0,00010368 t + 0,0000020736 t^2.$$

f) Wahre spezifische Wärme des überhitzten Wasserdampfes (kcal/kg, °C)
(nach Knoblauch, Raisch, Hausen und Koch).

Druck kg/cm ²	Temperatur °C																
	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
10	0,606	0,563	0,540	0,528	0,521	0,516	0,514	0,512	0,511	0,511	0,511	0,511	0,512	0,513	0,516	0,518	0,520
20			0,699	0,629	0,591	0,570	0,556	0,548	0,542	0,538	0,535	0,533	0,532	0,532	0,531	0,532	0,533
30				0,813	0,703	0,644	0,610	0,589	0,575	0,566	0,559	0,555	0,551	0,547	0,547	0,546	0,545
40					0,878	0,751	0,681	0,640	0,614	0,597	0,586	0,577	0,571	0,566	0,563	0,560	0,558
50						0,901	0,774	0,703	0,660	0,632	0,614	0,601	0,591	0,584	0,579	0,574	0,571
60							1,115	0,897	0,781	0,713	0,672	0,645	0,613	0,603	0,595	0,589	0,584
70								1,060	0,878	0,777	0,717	0,679	0,653	0,622	0,611	0,604	0,597
80								1,294	1,000	0,854	0,769	0,717	0,683	0,659	0,629	0,619	0,611
90								1,686	1,161	0,955	0,829	0,759	0,714	0,684	0,646	0,634	0,624
100									1,396	1,058	0,898	0,806	0,749	0,711	0,684	0,650	0,638
110									1,791	1,205	0,979	0,859	0,787	0,739	0,707	0,683	0,652
120										1,416	1,077	0,919	0,828	0,770	0,731	0,703	0,667

g) Mittlere spezifische Wärme des überhitzten Wasserdampfes in kcal/kg, °C von der Sättigungstemperatur an gerechnet (nach Knoblauch, Raisch, Hausen und Koch).

Druck kg/cm ²	Temperatur °C																
	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
10	0,617	0,583	0,567	0,556	0,548	0,542	0,538	0,534	0,531	0,529	0,527	0,526	0,525	0,524	0,523	0,523	0,523
20			0,722	0,676	0,650	0,629	0,614	0,603	0,594	0,586	0,580	0,575	0,571	0,568	0,565	0,562	0,560
30				0,833	0,774	0,733	0,700	0,677	0,660	0,645	0,634	0,625	0,617	0,611	0,605	0,600	0,596
40					0,918	0,856	0,796	0,757	0,728	0,706	0,689	0,674	0,663	0,653	0,644	0,637	0,631
50						0,977	0,905	0,846	0,802	0,771	0,745	0,725	0,709	0,695	0,683	0,674	0,665
60							1,161	1,031	0,944	0,883	0,839	0,777	0,756	0,738	0,723	0,710	0,699
70								1,173	1,056	0,972	0,912	0,867	0,833	0,804	0,783	0,747	0,733
80								1,377	1,188	1,069	0,994	0,935	0,890	0,855	0,827	0,804	0,785
90									1,349	1,187	1,082	1,008	0,952	0,909	0,875	0,847	0,804
100									1,568	1,317	1,190	1,092	1,021	0,968	0,893	0,865	0,842
110									1,901	1,510	1,311	1,186	1,098	1,034	0,943	0,910	0,883
120										1,734	1,465	1,302	1,187	1,106	0,997	0,958	0,926

i) Spezifische Wärme anorganischer Stoffe
(kcal/kg, °C).

Stoff	Temp. °C	Spez. Wärme	Stoff	Temp. °C	Spez. Wärme
a) Metalle			Zink	400	0,11
Aluminium	— 50	0,19	Zinn	0	0,054
„	0	0,21	b) Legierungen		
„	100	0,22	Aluminiumbronze	20—100	0,10
„	300	0,24	Bronze	20—100	0,086
Blei	— 200	0,026	Konstantan	20	0,098
„	0	0,031	„	100	0,10
„	100	0,032	Manganin	20	0,097
„	300	0,034	„	100	0,10
Chrom	0	0,10	Messing	20—100	0,092
„	300	0,12	Neusilber	20	0,087
„	500	0,15	Nickelstahl	20—100	0,11
Eisen	— 100	0,022	Rotguß	20	0,091
„	0	0,10	„	20—100	0,10
„	0—500	0,13	Stahl	20	0,12—
„	0—1100	0,15			0,13
„	0—1600	0,19	c) Sonstige Stoffe		
Gold	0	0,031	Aluminiumoxyd	0	0,20
Iridium	0	0,031	Basalt	0—100	0,21
Kobalt	0	0,099	Beton	20	0,21
Kupfer	0	0,091	Eisenoxyd	0	0,16
„	100	0,095	Gips	0	0,26
„	300	0,099	Glas (Thüringer)	20—100	0,20
„	900	0,13	Glaswolle	0	0,16
Magnesium	0	0,24	Kaliumchlorid	0	0,16
Mangan	0	0,11	Kalkstein	0—100	0,21
Molybdän	20	0,061	Kalziumchlorid	0	0,16
Nickel	0	0,11	Kalziumkarbonat	0	0,19
„	200	0,13	Kieselgur	20	0,20
„	800	0,15	Korund	0—100	0,20
Palladium	0	0,058	Leder	20	0,36
Platin	0	0,032	Marmor	0	0,20
„	0—1000	0,038	Natriumchlorid	0	0,21
Quecksilber	0	0,033	Porzellan	0—1000	0,26
„	400	0,033	Quarz	0—100	0,19
Rhodium	0	0,057	Quarzglas	0—100	0,17
Silber	0	0,056	„	0—500	0,23
„	250	0,059	„	0—900	0,25
„	0—600	0,060	„	0—1400	0,26
Silizium	0	0,17	Schwefel (rhom.)	20	0,17
Titan	0	0,10	„ (mon.)	20	0,18
Wolfram	0	0,030	Zement	20	0,26
„	1000	0,036	Ziegelstein	20	0,16
Zink	0	0,090			
„	100	0,095			

k) Mittlere spezifische Wärme von feuerfesten Stoffen
(kcal/kg, °C).

(Nach Cohn, Ber. Deutsch. Keram. Ges. 7, 154, 1926).

Material	20	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis	20 bis
		100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1400
Feldspat	0,160	0,161	0,162	0,168	0,179	0,191	0,202	0,211	0,222	0,246	0,262	—
Korund (künstl.)	0,194	0,203	0,214	0,223	0,231	0,248	0,251	0,259	0,272	0,304	—	—
Kristobalit	0,185	0,194	0,212	0,237	0,238	0,244	0,248	0,252	0,257	0,266	—	—
Quarz	0,176	0,190	0,206	0,217	0,228	0,239	0,256	0,257	0,260	0,267	—	—
Sand	0,176	0,190	0,205	0,214	0,223	0,233	0,251	0,254	0,257	0,267	—	—
Schamotte gebr.	0,184	0,199	0,215	0,227	0,233	0,239	0,243	0,248	0,252	0,261	0,267	0,274
Schamottetongebr.	0,194	0,197	0,202	0,213	0,220	0,231	0,238	0,244	0,251	0,277	—	—
Schamotteton (roh)	0,190	0,191	0,194	0,201	0,211	0,232	0,347	0,332	0,311	0,343	0,384	0,414
Sillimanit	0,161	0,161	0,161	0,163	0,167	0,170	0,173	0,174	0,175	0,175	0,199	0,205
Steingut (gebr.)	0,183	0,186	0,192	0,203	0,212	0,223	0,234	0,275	0,286	0,307	—	—
Tonerde (amorph)	0,196	0,199	0,202	0,216	0,227	0,240	0,250	0,258	0,268	0,305	—	—

l) Spezifische Wärme von Ammoniakprodukten.

(Nach W. Schairer, Glückauf 72, 454, 1936.)

	c_{pm} 92—22°	c_p 22°
Rohgaswasser (1,2%)	—	1,008
Gaswasser, abgetrieben	0,085	0,976
Gaswasser, abgetrieben und gefiltert	—	0,993

m) Spezifische Wärme von wäßrigen Ammoniaklösungen (kcal/kg, °C).

(Nach Wrewsky und Kaigorodoff,
Ztschr. phys. Chem. 112, 83, 1924.)

20,6°		41,0°		60,9°	
p	c	p	c	p	c
32,3	1,0128	20,97	1,0274	12,26	1,0269
24,05	0,9988	14,78	1,0214	8,20	1,0176
15,07	0,9946	8,18	1,0109	2,87	1,0064
8,53	1,0005	3,98	1,0034		
4,02	1,0013	1,47	0,9993		
2,87	1,0011				
1,47	0,9880				

p = Prozentgehalt in 100 Gewichtsteilen Lösung.

n) Mittlere spezifische Wärme von Koks (kcal/kg, °C).
(Nach Schläpfer und Debrunner, Monats-Bull. Schwz. Ver. 4, 21, 1924.)

Temperaturbereich	Koks mit einem Aschegehalt von					Graphit	Quarz
	5%	10%	15%	20%	25%		
20— 100°	0,193	0,193	0,193	0,192	0,192	0,192	0,190
20— 200°	0,225	0,224	0,223	0,222	0,220	0,226	0,204
20— 300°	0,252	0,250	0,248	0,247	0,245	0,255	0,217
20— 400°	0,277	0,275	0,272	0,269	0,267	0,280	0,227
20— 500°	0,297	0,294	0,290	0,287	0,284	0,300	0,235
20— 600°	0,313	0,309	0,306	0,302	0,298	0,317	0,242
20— 700°	0,327	0,323	0,318	0,318	0,310	0,330	0,247
20— 800°	0,337	0,333	0,328	0,324	0,319	0,342	0,250
20— 900°	0,347	0,342	0,337	0,332	0,327	0,353	0,253
20—1000°	0,356	0,351	0,345	0,340	0,335	0,362	0,256
20—1100°	0,363	0,359	0,353	0,348	0,342	0,371	0,258
20—1200°	0,369	0,363	0,358	0,352	0,346	0,377	—

Berechnung der mittleren spezifischen Wärme von Koks.

$$c_m = \frac{x}{100} \cdot c_a + \frac{y}{100} \cdot c_k + \frac{z}{100 \cdot s} \cdot c_g$$

- x = Prozentgehalt des Kokes an Asche,
- y = „ „ „ „ fixem Kohlenstoff,
- z = „ „ „ „ Restgas,
- s = spezifisches Gewicht des Restgases = 0,45,
- c_m = mittlere spezifische Wärme des Kokes,
- c_a = „ „ „ der Asche (= Quarz),
- c_k = „ „ „ des fixen Kohlenstoffs (= Graphit),
- c_g = „ „ „ des Restgases je Volumeneinheit (hierfür kann mit genügender Genauigkeit die mittlere spezifische Wärme des Kohlenoxyds eingesetzt werden).

o) Spezifische Wärme organischer Stoffe (kcal/kg, °C).

Stoff	Temp. °C	Spez. Wärme	Stoff	Temp. °C	Spez. Wärme
Azeton	20	0,52	Chloroform	0	0,23
Anilin	20	0,49	Dekalin	20	0,40
Asphalt	20	0,22	Diamant	0	0,11
Äther	20	0,57	„	100	0,19
Alkohol	20	0,58	„	600	0,44
Benzin	20	0,48—0,52	Erdöl	20	0,40—0,55
Benzol	0	0,36	Essigsäure	20	0,49
„	20	0,41	Gasöl	20	0,45—0,48
„	60	0,46	Glyzerin	20	0,58

Stoff	Temp. °C	Spez. Wärme	Stoff	Temp. °C	Spez. Wärme
Graphit	0	0,16	Petroläther	0	0,42
»	250	0,53	Petroleum	20	0,50
»	1000	0,47	Phenol	20	0,56
»	0—300	0,26	Propylalkohol	20	0,58
»	0—1100	0,37	Pyridin	20	0,41
Heptan	20	0,49	Schmieröl	20	0,45—0,55
Holz	20	0,50—0,65	Schwefelkohlenstoff	0	0,24
Holzkohle	20	0,16	Steinkohle	0	0,31
Kork	20	0,48	» geschüttet	0	0,20
Korkstein	20	0,41	Steinkohlenteer	40	0,35
Kresol	20	0,49	»	200	0,45
Methanol	20	0,60	Terpentinöl	0	0,41
Naphthalin	15	0,31	Tetrachlorkohlenstoff	20	0,20
»	45	0,33	Textilien	20	0,30—0,35
Nitrobenzol	20	0,36	Toluol	0	0,40
Olivener	20	0,40	»	50	0,44
Paraffin	20	0,48	Xylol	20	0,40
Pentan	20	0,51	Zyklohexan	20	0,50

p) Spezifische Wärme von Benzolzerzeugnissen und Benzolwaschölen von 92—22° C.

(Nach W. Schairer, Glückauf 72, 454, 1936.)

	$c_{p_m 92-220}$	$c_{p 220}$		$c_{p_m 92-220}$	$c_{p 220}$
Benzolvorprodukt aus aromatischem Benzolwaschöl	0,395	0,370	Rohteer	0,413	0,405
Benzolvorprodukt aus aliphatischem Benzolwaschöl	—	0,402	Steinkohlenteeröl	0,414	0,407
Motorenbenzol 1.	0,395	0,383	Benzolwaschöl, angereichert (aromatisch)	0,365	0,361
Motorenbenzol 2.	0,402	0,355	Benzolwaschöl, abgetrieben (aromatisch)	0,350	0,350
Solventnaphtha	0,401	0,362	Benzolwaschöl, angereichert (aliphatisch)	—	0,452
Leichtöl	0,413	0,365	Benzolwaschöl, abgetrieben (aliphatisch)	—	0,441
Mittelöl (41,5% Naphthalin)	0,589	0,360			

14. Wärmeübertragung.

Der Ausdruck Wärmeübertragung umfaßt all die Erscheinungen, die für die Überführung einer Wärmemenge von einem Medium auf ein zweites maßgeblich sind. Die Wärmeübertragung wird daher unterteilt in Wärmeleitung, Wärmeübergang, Wärmedurchgang und Wärmestrahlung.

a) Wärmeleitung.

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist diejenige Wärmemenge, die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt von 1 m² fließt, wenn senkrecht zu diesem

Querschnitt das Temperaturgefälle von 1° je 1 m herrscht; sie hat im technischen Maßsystem die Dimension kcal/m h °C. Praktisch bestimmt wird zumeist das Temperaturleitvermögen λ , aus dem die Wärmeleitzahl gemäß der Formel

$$\lambda = c \cdot d \cdot \alpha$$

berechnet wird (d = Dichte des Stoffes, c = spezifische Wärme desselben).

Theoretisch ergibt sich das Wärmeleitvermögen durch die Übertragung der Energie durch Molekülstöße bzw. durch Molekülschwingungen bei geordneten Molekülsystemen. Bei Gasen wird die Wärmeleitzahl daher bestimmt durch die freie Weglänge, die mitgeführte Energie der Moleküle und die Zahl der Freiheitsgrade.

Ferner gilt bei Gasen die Gesetzmäßigkeit

$$\lambda = \mu \cdot c_v \cdot g \cdot \varepsilon,$$

worin μ die Zähigkeit, c_v die spezifische Wärme der Gewichtseinheit des Gases bei konstantem Volumen, g die Erdbeschleunigung und ε einen von der Atomzahl des Gases abhängigen unbenannten Zahlenwert bedeuten. ε besitzt mit großer Annäherung folgende Werte:

Atomzahl der Moleküle	1	2	3	4	5	6
ε	2,50	1,74	1,51	1,32	1,28	1,24

b) Wärmeleitzahlen λ von Gasen (kcal/m h °C).

Gas	0°	100°	Gas	0°	100°
Kohlendioxyd . . .	0,0121	0,0180	Schwefeldioxyd . . .	0,0070	—
Kohlenoxyd . . .	0,0196	—	Wasserstoff . . .	0,145	0,184
Luft	0,0204	0,0259	Wasserdampf . . .	—	0,0199
Methan	0,0259	—	Äthylen	0,0145	0,0229
Sauerstoff	0,0207	0,0268	Ammoniak	0,0185	0,0255
Stickstoff	0,0203	0,0258	Azetylen	0,0158	—

Wärmeleitzahlen λ verschiedener Gase bei 0°.

(Nach J. Ulsamer, Ztschr. VDI 80, 537, 1936.)

Gas	kcal/m h °C	Gas	kcal/m h °C
Luft (gereinigt und getrocknet)	2,066 · 10 ⁻²	Sauerstoff	2,099 · 10 ⁻²
Wasserstoff	14,90 · 10 ⁻²	Stickstoff	2,063 · 10 ⁻²
		Kohlendioxyd	1,24 · 10 ⁻²

c) Wärmeleitzahlen λ anorganischer Stoffe (kcal/m h °C)¹⁾.

Aluminium	180—190	Konstantan	200
»	190—200 (400 ⁰)	Kreide	0,8
Asbestfaser	0,1—0,2	Kupfer	300—350
Asbestpappe	0,2	Lava	0,7
Asbestschiefer	0,2	Leichtbeton	0,2—0,5
Basalt	1,15	Marmor	2,5
Beton	0,65—0,70	Messing	80—100
Blei	30	Neusilber	25
Bruchsteinmauerwerk	1,4—2,0	Nickel	50
Eis	2,1 (0 ⁰)	Platin	60
Eisen		Porzellan	0,9—1,0
Elektrolyteisen	76	Quarzsand (trocken)	0,25—0,30
Gußeisen	35—55	Quecksilber	6,5
Schmiedeeisen	50—55	Rotguß	50—60
Bessemerstahl	35—40	Sandstein (trocken)	1,1
Thomasstahl	45	Schamotte	0,5
Nickelstahl (30% Ni)	110	»	1,2 (500 ⁰)
Erdreich, feucht	0,4—0,6	»	1,4 (1000 ⁰)
Gips	0,36	Schlackenwolle	0,04—0,06
Glas	0,6—0,8	Silber	360
Glaswolle	0,035—0,05	Speckstein	2,8—3
Glimmer	0,3	Ton, feuerfest	0,7—1,2
Gold	250	Verputz	0,7
Hohlziegelmauerwerk	0,25—0,30	Wasser	0,45 (0 ⁰)
Kalksandstein	0,6	»	0,55 (50 ⁰)
Kalkstein	0,8	»	0,59 (75 ⁰)
Kesselstein	1—2,5	Zement	0,8
Kiesbeton	0,6—1,1	Ziegelstein (trocken)	0,45—0,65
Kieselgur	0,05	Ziegelmauerwerk	0,35—0,5
»	0,08 (300 ⁰)	Zink	100
Kohlenschlacke	0,13	Zinn	55

d) Wärmeleitzahlen λ organischer Stoffe (kcal/m h °C)²⁾.

Alkohol	0,18	Kohle	
Asphalt	0,5—0,6	Kohlenstaub	0,095
Baumwolle	0,05	Koks	7,2 (1000 ⁰)
Benzin	0,13	Steinkohle	0,12—0,15
Benzol	0,125	Kork (Pulver)	0,025—0,030
Ebonit	0,14—0,16	Korkplatte	0,035—0,05
Filz (Haar-)	0,03	Leder	0,14
» (Woll-)	0,05	Linoleum	0,16
Glyzerin	0,25	Maschinenöl	0,1
Graphit	4,0—4,5	Pappe	0,16
Gummi	0,15—0,3	Petroleum	0,13
Holz		Paraffin	0,17
Eichenholz z. Faser	0,3	Sägemehl	0,05
» z. »	0,18	Torfplatte	0,04—0,05
Kiefernholz z. Faser	0,3	Vulkanfaser	0,18—0,30
» z. »	0,14	Watte	0,035
		Wolle	0,03—0,035
		Zelluloid	0,18

¹⁾ Wenn nichts besonderes vermerkt gültig bei 20⁰.

²⁾ Wenn nicht besonders vermerkt gültig bei 20⁰.

e) Wärmeübergang.

Der Wärmeübergang bedeutet den Wärmeaustausch zwischen einem strömenden Gas oder einer strömenden Flüssigkeit und der festen Begrenzungswand. In einfachen Fällen wird damit nur eine Erwärmung oder Abkühlung eines gasförmigen oder flüssigen Mediums bewirkt, sehr oft ist dieser reine Temperaturaustausch noch mit physikalischen Zustandsänderungen (Kondensation, Verdampfung, Erstarrung usw.) verbunden.

Der Wärmeübergang ist abhängig von der Zeitdauer, dem Temperaturunterschied zwischen Wand und gasförmigem bzw. flüssigem Medium und der Größe des Wandelementes. Die Wärmeübergangszahl α (kcal/m² h °C) wird vornehmlich bestimmt von der Form der (Rauigkeit) wärmeaufnehmenden bzw. wärmeabgebenden Flächen, sowie von der Art und Strömungsgeschwindigkeit des zweiten Mediums. Es ist daher unmöglich, die bestehenden Gesetzmäßigkeiten durch genaue Zahlenwerte festzulegen. Im allgemeinen gelten jedoch für α folgende Werte:

bei sogenannter ruhender Luft	$\alpha =$	3—30
bei bewegter Luft	$\alpha =$	10—500
bei bewegten nicht siedenden Flüssigkeiten	$\alpha =$	200—5000
bei siedenden Flüssigkeiten	$\alpha =$	4000—6000
bei kondensierenden Dämpfen	$\alpha =$	7000—12000

f) Wärmeübergangszahlen der Ofenaußenwände.

(Mitteilung Nr. 51 der Wärmestelle Düsseldorf.)

Äußere Oberflächen- temperatur der Wand °C	Wärmeübergangszahl α (Strahlung und Konvektion der senkrechten oder waagerechten Wand) kcal/m ² h °C	Stündliche Wärme- abgabe der Wand bei einer Außen- temperatur von 10 °C kcal/m ² h
10	7,4	0
25	8,6	129
40	9,6	288
60	10,9	545
80	11,6	811
100	12,4	1119
130	13,8	1655
160	15,2	2280
200	17,4	3300
240	19,3	4400
280	21,4	5780
320	24,1	7470
350	26,1	8870
400	29,8	11620
500	38,5	18860
600	49,3	29150

g) Wärmedurchgang¹⁾.

Wenn Gas- oder Flüssigkeitsströme durch eine feste Zwischenwand getrennt sind, wird die zwischen diesen eintretende Wärmeübertragung als Wärmedurchgang bezeichnet ($\text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$).

Für den Wärmedurchgang durch eine ebene Wand von der Oberfläche F (m^2), der Wandstärke Δ , der Wärmeleitzahl λ ($\text{kcal/m h } ^\circ\text{C}$), den Wandoberflächentemperaturen Θ_1 und Θ_2 , den Temperaturen des heißeren und kälteren Mediums ϑ_1 und ϑ_2 ($^\circ\text{C}$) und den beiderseitigen Wärmeübergangszahlen α_1 und α_2 ($\text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$) gelten an den beiden Wandoberflächen A und B die Gleichungen

$$\begin{array}{ll} \text{Oberfläche } A & Q_1 = \alpha_1 \cdot F \cdot (\vartheta_1 - \Theta_1) \cdot t \\ \text{Oberfläche } B & Q_2 = \alpha_2 \cdot F \cdot (\Theta_2 - \vartheta_2) \cdot t \end{array}$$

und für die Wärmeleitung durch die Wand:

$$Q_3 = \lambda \cdot F \cdot \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Delta} \cdot t.$$

Im Beharrungszustand ist $Q_1 = Q_3 = Q_2$.

Nach Elimination der Wandtemperaturen aus den obigen Gleichungen erhält man daraufhin

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\Delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot t = k \cdot F \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot t.$$

In der letzten Gleichung stellt k als die Abkürzung des Bruches die Wärmedurchgangszahl ($\text{kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$) dar.

Die gleichen Verhältnisse gelten für Rohrwandungen, jedoch mit der Abänderung, daß die Eintrittsfläche und Austrittsfläche der Wand nicht mehr gleich sind. Für ein Rohr der Länge dL , dem Außendurchmesser d_a und dem Innendurchmesser d_i gilt die Gleichung

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i}} \cdot \pi \cdot dL \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot t \\ &= k_R \cdot \pi \cdot dL \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot t. \end{aligned}$$

Die Wärmedurchgangszahl k_R ($\text{kcal/m h } ^\circ\text{C}$) wird in diesem Fall nicht mehr auf die Flächeneinheit, sondern auf die Längeneinheit des Rohres bezogen.

Bei den obigen Ableitungen wird vorausgesetzt, daß auf den beiden Seiten der Zwischenwand jeweils eine einheitliche Temperatur des Mediums herrscht. Dies ist im praktischen Betrieb jedoch nicht der Fall infolge der Erwärmung bzw. Abkühlung. Ferner ist zu unterscheiden

¹⁾ Einzelheiten siehe Berliner-Scheel, Physikalisches Handwörterbuch, 1932, Verlag Springer, S. 1346.

zwischen Gleichstrom und Gegenstrom der beiden Medien, so daß sich eine weitere Untertrennung in Wärmeübergang im Gleichstrom oder im Gegenstrom ergibt.

Für den Wärmedurchgang im Gleichstrom gilt die Gleichung

$$Q = W_1 \cdot (\vartheta_{1,a} - \vartheta_{2,a}) \cdot \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \frac{k \cdot F}{W_1}}}{1 + \frac{W_1}{W_2}}$$

Darin bedeuten W_1 und W_2 den Wasserwert für die heißere und kältere Flüssigkeit, die in der Zeiteinheit an der Wand entlangströmen, d.h. das Gewicht der Wassermenge, die zur Erwärmung um 1°C die gleiche Wärmemenge erfordert wie die entsprechende Flüssigkeit:

$$W = \frac{\text{Flüssigkeitsvolumen}}{\text{Zeiteinheit}} \times \text{spez. Gewicht} \times \text{spez. Wärme.}$$

Die Indizes a und e gelten für Rohranfang bzw. Rohrende, 1 und 2 für die heißere bzw. die kältere Flüssigkeit.

In der obigen Gleichung stellt der erste Ausdruck $W_1 \cdot (\vartheta_{1,a} - \vartheta_{2,a})$ diejenige Wärmemenge dar, die die heißere Flüssigkeit abgeben würde, wenn sie vollständig bis zur Anfangstemperatur der kälteren Flüssigkeit abgekühlt werden könnte. Der nachfolgende Bruch, dessen Wert stets geringer als 1 ist, zeigt den Bruchteil der Wärmemenge an, der in Wirklichkeit ausgetauscht wird und ist somit nur von den beiden Größen

$$\frac{W_1}{W_2} \quad \text{und} \quad \frac{k \cdot F}{W_1}$$

abhängig.

Bei dem Wärmeaustausch im Gleichstrom gelten für den obigen Bruch in Abhängigkeit von $\frac{W_1}{W_2}$ und $\frac{k \cdot F}{W_1}$ folgende Zahlenwerte:

$\frac{W_1}{W_2} =$	0,00	0,05	0,2	1	5	20	100
$\frac{k \cdot F}{W_1} = 1/30$	0,033	0,033	0,033	0,033	0,032	0,024	0,009
$= 1/3$	0,28	0,28	0,27	0,25	0,14	0,05	0,01
$= 1$	0,63	0,62	0,58	0,43	0,17	0,05	0,01
$= 3$	0,96	0,91	0,81	0,50	0,17	0,05	0,01
$= \infty$	1,00	0,95	0,83	0,50	0,17	0,05	0,01

Der Wärmedurchgang im Gegenstrom wird berechnet nach der Gleichung

$$Q = W_1 \cdot (\vartheta_{1,a} - \vartheta_{2,a}) \cdot \frac{1 - e^{-\left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \frac{k \cdot F}{W_1}}}{1 - \frac{W_1}{W_2} \cdot e^{-\left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \frac{k \cdot F}{W_1}}}$$

Für einige Zahlenwerte ist der Wert dieses Bruches nachstehend zusammengestellt:

$\frac{W_1}{W_2} =$	0	0,05	0,2	1	5	20	100
$\frac{k \cdot F}{W_1} = \frac{1}{30}$	0,033	0,033	0,033	0,033	0,032	0,024	0,010
$= \frac{1}{3}$	0,28	0,28	0,28	0,25	0,16	0,05	0,01
$= 1$	0,63	0,62	0,60	0,51	0,20	0,05	0,01
$= 3$	0,95	0,94	0,93	0,77	0,20	0,05	0,01
$= \infty$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	0,05	0,01

Für den Vergleich der Wirksamkeit des Wärmeaustausches bei Gleichstrom und Gegenstrom werden beide Formeln durcheinander dividiert. Dabei erhält man nur noch das Verhältnis der Brüche, d. h. eine Abhängigkeit von den beiden Größen

$$\frac{W_1}{W_2} \text{ und } \frac{k \cdot F}{W_1}$$

Für das Verhältnis Gleichstrom:Gegenstrom gelten beispielsweise folgende Werte:

$\frac{W_1}{W_2} =$	0,00	0,05	0,2	1	5	20
$\frac{k \cdot F}{W_1} = \frac{1}{30}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$= \frac{1}{3}$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	1,00
$= 1$	1,00	1,00	0,97	0,84	0,85	1,00
$= 3$	1,00	1,97	0,87	0,65	0,85	1,00
$= \infty$	1,00	1,95	0,83	0,50	0,85	1,00

h) Wärmestrahlung.

Von den Gasen weisen nur Wasserdampf und Kohlendioxyd ein Bandenspektrum auf, das zum Teil im wirksamen Wellenbereich liegt. Eine rechnerische Erfassung dieser Gaswärmestrahlung ist jedoch sehr schwierig, da für jede der drei Banden der beiden Gase die Emissions- und Absorptionsvorgänge getrennt ermittelt werden müssen. Andererseits erfolgt bei hohen Flammentemperaturen die Wärmeübertragung zu etwa 50 bis 80% durch Wärmestrahlung und nur zum kleineren Teil durch Konvektion und Leitung. Noch größer ist der Anteil der Wärmestrahlung bei Leuchtflammen und bei stark mit Staub verunreinigten Gasen oder bei Kohlenstaubfeuerungen.

Die Strahlung der Oberflächen von festen Körpern erfolgt über den gesamten wirksamen Wellenbereich ziemlich gleichmäßig. Die Wirksamkeit des Überganges der Strahlungsenergie wird jedoch beeinflusst durch die Strahlungsabsorption des gasförmigen Zwischenmediums sowie von dem Emissions- bzw. Absorptionsvermögen der strahlenden und bestrahlten Flächen.

Ohne Berücksichtigung dieser erschwerenden Faktoren und unter Annahme einer grauen Strahlung gilt mit guter Annäherung die Gleichung:

$$Q = C \cdot f \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ kcal/h.}$$

Darin bedeuten C einen Faktor (Strahlungszahl), der von der Beschaffenheit der strahlenden Oberfläche und dessen Farbe, f die Größe der strahlenden Oberfläche und T dessen absolute Temperatur. Im einzelnen sind bisher für den Proportionalitätsfaktor C beispielsweise folgende Werte ermittelt worden (nach Gröber):

Stoff	C	Stoff	C
Gestein, glatt geschliffen . . .	1,9—3,4	Lampenruß . . .	4,40
Glas, glatt . . .	4,40	Schmiedeeisen, matt, oxydiert	4,40
Gußeisen, rau, oxydiert . . .	4,48	» blank . . .	1,60
Kalkmörtel, weiß, rau . . .	4,30	» stark poliert . . .	1,33
Kupfer, schwach poliert . . .	0,79	Abs. schwarzer Körper . . .	4,95

Weitere Einzelheiten über Wärmestrahlung s. Schack, Ztschr. f. techn. Physik 5, 278, 287 (1924); 6, 530 (1925). In diesen Mitteilungen über die Strahlung der Feuergase und ihre praktische Berechnung werden Annäherungsformeln zur Berechnung der Strahlung von Kohlen säure und Wasserdampf enthaltenden Gasen angegeben.

15. Zustandsgleichung der Gase.

a) Begriff.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Temperatur T , Druck p und spezifischem Volumen v idealer Gase wird nach dem Boyle-Mariotteschen und dem Gay-Lussacschen Gesetz durch die Zustandsgleichung

$$p \cdot v = R T$$

dargestellt, worin R die Gaskonstante bedeutet. Bei realen Gasen zeigen sich gegenüber den nach der Zustandsgleichung zu erwartenden Werten vor allem bei höheren Drücken erhebliche Abweichungen, die mit großer Annäherung durch die Zustandsgleichung von van der Waals

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R \cdot T$$

vermieden werden¹⁾. In dieser Gleichung bedeuten a und b zwei für jedes Gas charakteristische Konstanten. Diese stehen mit den kritischen

¹⁾ Über die Bedeutung der Abweichungen von der einfachen Zustandsgleichung bei der Verdichtung technischer Gase und über die Meßtechnik bei der Flaschengasversorgung siehe Mezger und Payer, GWF. 79, 113, 133 (1936).

Werten der Gase in folgender Beziehung:

$$a = \frac{27}{64 \cdot 273^2} \cdot \frac{T_k^2}{p_k}, \quad b = \frac{1}{8 \cdot 273} \cdot \frac{T_k}{p_k},$$

worin T die absolute Temperatur, T_k die kritische Temperatur (absolut) und p_k den kritischen Druck (at) bedeuten.

Wenn der Druck p in Bruchteilen des kritischen Druckes p_k , das Volumen v in Bruchteilen des kritischen Volumens v_k , das auf das des Gases bei 0° 760 Torr bezogen ist und die Temperatur T in Bruchteilen der kritischen Temperatur T_k ausgedrückt wird, wobei man die Größen p_r , v_r und T_r als reduzierten Druck, reduziertes Volumen und reduzierte absolute Temperatur bezeichnet, d. h.

$$p_r = \frac{p}{p_k}, \quad v_r = \frac{v}{v_k}, \quad T_r = \frac{T}{T_k},$$

so ändert sich die van der Waals'sche Zustandsgleichung zu der reduzierten Zustandsgleichung um:

$$\left(p_r + \frac{3}{v_r^2}\right) (3v_r - 1) = 8T_r.$$

Die Zahlenwerte von a und b sind für die wichtigsten Gase nachstehend zusammengestellt.

b) Konstanten für die van der Waals'sche Zustandsgleichung.

Gas	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^4$	Gas	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^4$
Azetylen	875	229	Luft	270	164
Äthan	1065	282	Methan	453	190
Äthylen	890	253	Propan	1740	380
Ammoniak	835	166	Propylen	1670	369
Argon	265	140	Sauerstoff	271	142
<i>n</i> -Butan	2884	547	Schwefeldioxyd	1340	252
<i>i</i> -Butan	2564	510	Schwefelwasserstoff	885	192
Cyan	1528	308	Stickoxyd	267	125
Cyanwasserstoff	2220	394	Stickstoff	268	172
Helium	6,8	106	Wasser	1089	136
Kohlendioxyd	717	191	Wasserstoff	48,7	119
Kohlenoxyd	290	175			

16. Kritische Erscheinungen.

a) Kritische Konstanten von Gasen.

Die Temperatur t_k , oberhalb der unabhängig vom angewandten Druck eine Flüssigkeit aufhört, in der flüssigen Phase bestehen zu können, stellt die kritische Temperatur, die Dampfspannung der Flüssigkeit bei dieser Temperatur den kritischen Druck p_k , ihre Dichte (auf Wasser von 4° C bezogen) die kritische Dichte d_k und ihr spezifisches Volumen das kritische Volumen dar.

Gas	t_k °C	p_k at	d_k g/cm ³	Stoff	t_k °C	p_k at	d_k g/cm ³
Azetylen	35,9	61,6	0,231	Methylchlorid	142,8	66	0,37
Äthan	35,0	48,8	0,21	Methylsulfid	229	—	0,30
Äthylchlorid	182,9	54	—	Neon	44,7	27,2	0,48
Äthylen	9,5	50,7	0,216	Ozon	— 5	67	0,54
Ammoniak	132,4	112	0,236	Phosgen	182	56	0,52
Argon	— 122,4	48	0,52	Propan	95,6	45	—
<i>n</i> -Butan	153,2	35,7	—	Propylen	92,0	45,3	—
<i>i</i> -Butan	133,7	36,5	—	Sauerstoff	— 118,8	49,7	0,430
Chlor	143,9	76	0,573	Schwefeldioxyd	157,5	77,8	0,524
Chlorwasserstoff	51,4	83	0,61	Schwefeltrioxyd	218,3	83,8	0,633
Cyan	128,3	59,7	—	Schwefelwasserstoff	100,4	89	—
Cyanwasserstoff	183,5	53,2	0,195	Stickoxyd	— 93	71	0,459
Helium	— 267,9	2,26	0,066	Stickoxydul	35,4	75	0,45
Kohlendioxyd	+ 31,0	72,9	0,468	Stickstoff	— 147,1	33,5	0,311
Kohlenoxyd	— 140,2	34,5	0,301	Wasserdampf	374,1	218,5	0,324
Luft	— 140,7	37,2	0,31	Wasserstoff	— 239,9	12,8	0,031
Methan	— 82,5	45,7	0,162				

b) Kritische Konstanten von Kohlenwasserstoffen.

Stoff	t_k °C	p_k at	d_k g/cm ³	Stoff	t_k °C	p_k at	d_k g/cm ³
Pentan	197	33,0	0,232	Petroläther	210	—	—
Hexan	234	29,6	0,234	Leichtbenzin	300	—	—
Heptan	296	24,7	0,233	Schwerbenzin	350	—	—
Okтан	346	21,2	0,230	Gasöl	460	—	—
Pentadekan	444	15,8	0,221	Benzol	288,5	49,5	0,305

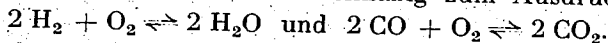
17. Dissoziation der Gase und Gleichgewichtskonstanten.

a) Begriff der Dissoziation.

Abgesehen von der thermischen Unbeständigkeit zahlreicher Gase, vor allem der Kohlenwasserstoffe, tritt bei nahezu sämtlichen anderen Gasen bei entsprechend hohen Temperaturen ein mehr oder weniger vollständiger Zerfall der Moleküle in einfachere Bestandteile (Dissoziationsprodukte) ein. Würde eine Dissoziation der Verbrennungsabgase nicht stattfinden, so könnte man sich vorstellen, daß durch stufenweise Vorwärmung eines brennbaren Gemisches seine Grenztemperatur beliebig hoch gesteigert werden würde.

Erhitzt man ein mehratomiges Gas wie Kohlendioxyd oder Wasserdampf auf Temperaturen oberhalb 1500°, so läßt sich nachweisen, daß eine teilweise Zersetzung in Kohlenoxyd und Sauerstoff bzw. Wasserstoff und Sauerstoff stattfindet und die Gemische bei solchen Temperaturen die drei Bestandteile Kohlenoxyd, Sauerstoff und Kohlendioxyd bzw. Wasserstoff, Sauerstoff und Wasserdampf enthalten. Wenn sich dann bei einer bestimmten Temperatur die Zusammensetzung des Gemisches nicht mehr ändert, so befindet sich das Gemisch im »chemischen Gleichgewicht«. Erklären läßt sich dieser Gleichgewichtszustand

damit, daß dem Bestreben der Ausgangsstoffe, eine Verbindung einzugehen, ein gleich wirksames Bestreben der Reaktionsprodukte zum Zerfall mit einer Wärmetönung von gleicher Größe, aber entgegengesetztem Vorzeichen, entgegensteht. Im Gleichgewichtszustand bilden sich dann in gleichen Zeiten ebensoviel neue Reaktionsprodukte als schon vorhandene wieder zerfallen oder formelmäßig zum Ausdruck gebracht:



Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Gleichgewicht so, daß die Menge an freiem Wasserstoff und Kohlenoxyd größer wird. Es kommt ein Teil der brennbaren Gase Kohlenoxyd und Wasserstoff nicht zur Verbrennung. Damit verringert sich nicht nur die zur Verbrennung gelangende Gasmenge, sondern der nicht zur Verbrennung gelangende Teil wirkt sogar gewissermaßen als Ballast, so daß sich eine wesentlich niedrigere Grenztemperatur ergibt, als sich aus Heizwert und mittlerer spezifischer Wärme der Abgase nach dem bisher üblichen Verfahren ohne Berücksichtigung der Dissoziation errechnen läßt.

Als unterste Grenze einer merklichen Dissoziation kann allgemein ungefähr eine Temperatur von 1500 bis 1600° angenommen werden.

Der Dissoziationsgrad α gibt den Bruchteil des je 1 Vol. Ausgangsgas zerfallenden Anteils an, wobei $n_1 \alpha + n_2 \alpha$ Vol. Dissoziationsprodukte entstehen.

Ein Beispiel soll dies näher erläutern. Oberhalb 2000° beginnt Sauerstoff gemäß der Gleichgewichtsreaktion



in seine Atome zu zerfallen. Für diese homogene Gleichgewichtsreaktion gilt gemäß dem Massenwirkungsgesetz die Gleichung der Reaktionsisotherme

$$K_c = \frac{[2 \text{O}]^2}{[\text{O}_2]},$$

worin K_c die temperaturabhängige Gleichgewichtskonstante und die in eckige Klammern gefaßten Ausdrücke die Konzentrationen an atomarem bzw. molekularem Sauerstoff bedeuten. Bei Einführung der Dissoziationskonstante α und Ersatz der Konzentrationen durch entsprechende Partialdrücke läßt sich die Gleichung wie folgt umformen:

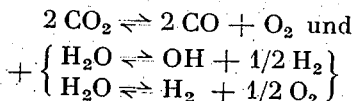
$$K_p = \frac{p \cdot 4 \alpha^2}{1 - \alpha^2}.$$

Bei der Dissoziation von Kohlendioxyd und Wasserdampf ist der Dissoziationsgrad α abhängig vom Teildruck und der Temperatur. Die Abhängigkeit vom Druck bei gegebener, fester Temperatur wird dargestellt durch die Gleichung der Dissoziationsisotherme:

$$K_p = p \cdot \frac{\alpha^3}{(2 + \alpha)(1 - \alpha)^2},$$

wobei K_p für eine gegebene Temperatur einen festen Wert hat

Auf Grund der von Justi¹⁾ nach verschiedenen Literaturangaben zusammengestellten Werte für die Dissoziationsgleichgewichtskonstanten K_p und Dissoziationsgrade α für die Dissoziationsgleichungen



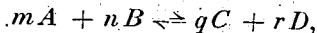
sind die Dissoziationsgrade α in Prozenten für den gesamten für praktische Rechnungen in Frage kommenden Teildruckbereich berechnet²⁾ und in den nachfolgenden Zahlentafeln zusammengestellt worden. Etwa erforderliche Zwischenwerte lassen sich leicht interpolieren.

d) Gleichgewichtskonstanten verschiedener Reaktionen.

Eine Anwendung des dritten Hauptsatzes der Thermodynamik auf die Berechnung der Gleichgewichtskonstanten von Gasreaktionen ist infolge des Erfordernisses der Kenntnis zahlreicher thermodynamischer Größen in den meisten Fällen sehr schwierig. Durch Anwendung der Nernstschen Näherungsformel können die Gleichgewichtszustände von Gasreaktionen dagegen verhältnismäßig einfach berechnet werden. Diese lautet:

$$\log K_p = - \frac{U}{4,57 T} + \Sigma \nu \cdot 1,75 \log T + \Sigma \nu_j$$

darin bedeuten U die auf Zimmertemperatur bezogene Wärmetönung unter konstantem Druck, T die absolute Temperatur, $\Sigma \nu$ die Differenz der Molsummen der verschwindenden und der entstehenden Stoffe $(q + n) - (p + r)$ gemäß



wo ν_j die gleichartige Differenz der algebraischen Summen der »konventionellen chemischen Konstanten« und

$$K_p = \frac{p_A^m \cdot p_B^n}{p_C^q \cdot p_D^r},$$

worin p die Teildrucke der Reaktionsteilnehmer in at_a angeben.

Konventionelle chemische Konstanten.

H ₂	1,6	CO	3,5	NO	3,5
N ₂	2,6	CO ₂	3,2	H ₂ S	3,0
O ₂	2,8	CH ₄	2,5	SO ₂	3,3
Cl ₂	3,1	HCN	3,4	NH ₃	3,3
H ₂ O	3,6	C ₆ H ₆	3,0	CS ₂	3,1

¹⁾ Forschung a. d. Geb. d. Ingenieurwesens 6, 209 (1935).

²⁾ H. Brückner und W. Bender, Gas- und Wasserfach 79, 701 (1936).

Für die Gleichgewichtsreaktionen der wichtigsten Gasreaktionen in Abhängigkeit von der Temperatur gelten folgende Zahlenwerte:

$2\text{H} \rightleftharpoons \text{H}_2$	$K_p = \frac{p_{\text{H}}^2}{p_{\text{H}_2}}$	$\log K_p = \frac{-19700}{T} + 4,89$
$2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$	$K_p = \frac{p_{\text{NO}_2}^2 \cdot p_{\text{O}_2}}{p_{\text{NO}}^2}$	$\log K_p = \frac{-5749}{T} + 1,70 \log T - 5 \cdot 10^{-4} T + 2,839$
$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$	$K_p = \frac{p_{\text{NH}_3}^2}{p_{\text{N}_2} \cdot p_{\text{H}_2}^3}$	$\log K_p = \frac{2098}{T} - 2,509 \log T - 1,006 \cdot 10^{-4} T + 1,859 \cdot 10^{-7} T^3 + 20$
$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$	$K_p = \frac{p_{\text{CH}_4}}{p_{\text{H}_2}^2}$	$t^\circ\text{C} \quad \quad 480^\circ \quad \quad 580^\circ \quad \quad 680^\circ \quad \quad 760^\circ \quad \quad 880^\circ$
$\text{S}_2 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{S}$	$K_p = \frac{p_{\text{S}_2} \cdot p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{H}_2\text{S}}^2}$	$\log K_p \quad \quad 0,6905 \quad \quad 0,9629-1 \quad \quad 0,3922-1 \quad \quad 0,0476-1 \quad \quad 0,5751-2$
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$	$K_p = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{CO}}}{p_{\text{H}_2} \cdot p_{\text{CO}_2}}$	$t^\circ\text{C} \quad \quad 750^\circ \quad \quad 830^\circ \quad \quad 945^\circ \quad \quad 1065^\circ \quad \quad 1132^\circ$
		$K_p \cdot 10^4 \quad \quad 0,89 \quad \quad 3,8 \quad \quad 24,5 \quad \quad 118 \quad \quad 260$
		$\log K_p = \frac{-2203,4}{T} - 5,159 \cdot 10^{-5} T$
		$-2,5426 \cdot 10^{-7} T^2 + 7,462 \cdot 10^{-11} T^3 + 2,3$

b) Dissoziation von Kohlendioxyd.
Dissoziationsgrad α in %.

Temp. °C	Teildruck des Kohlendioxyds in at																							
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
1500	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9	0,85	0,83	0,79	0,75	0,72
1700	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,75	1,7	1,65	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3
1800	6,9	6,3	5,9	5,5	5,2	5,1	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,75	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2
1900	11,1	10,1	9,5	8,9	8,5	8,1	7,8	7,6	7,2	6,8	6,5	6,3	6,1	5,6	5,3	5,1	4,9	4,7	4,5	4,3	4,1	3,9	3,7	3,6
2000	18,0	16,5	15,4	14,6	13,9	13,4	12,9	12,5	11,8	11,2	10,8	10,4	10,0	9,4	8,8	8,4	8,0	7,7	7,4	7,1	6,8	6,5	6,2	6,0
2100	25,9	23,9	22,4	21,3	20,3	19,6	18,9	18,3	17,3	16,6	15,9	15,3	14,9	13,9	13,1	12,5	12,0	11,5	11,2	10,5	10,1	9,7	9,3	9,0
2200	37,6	35,1	33,1	31,5	30,3	29,2	28,3	27,5	26,1	25,0	24,1	23,3	22,6	21,2	20,1	19,2	18,5	17,9	17,3	16,4	15,6	15,0	14,5	14,0
2300	47,6	44,7	42,5	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,3	32,9	31,8	30,9	30,0	28,2	26,9	25,7	24,8	24,0	23,2	22,1	21,1	20,3	19,6	19,0
2400	59,0	56,0	53,7	51,8	50,2	48,8	47,6	46,5	44,6	43,1	41,8	40,6	39,6	37,5	35,8	34,5	33,3	32,3	31,4	29,9	28,7	27,7	26,8	26,0
2500	69,7	66,3	64,1	62,2	60,6	59,3	58,0	56,9	55,0	53,4	52,0	50,7	49,7	47,3	45,4	43,9	42,6	41,4	40,4	38,7	37,2	36,0	34,9	34,0
2600	77,7	75,2	73,3	71,6	70,2	68,9	67,8	66,7	64,9	63,4	62,0	60,8	59,7	57,4	55,5	53,8	52,4	51,2	50,1	48,2	46,6	45,3	44,1	43,0
2700	84,4	82,5	81,1	79,8	78,6	77,6	76,6	75,7	74,1	72,8	71,6	70,5	69,4	67,3	65,5	63,9	62,6	61,3	60,3	58,4	56,8	55,4	54,1	53,0
2800	89,6	88,3	87,2	86,1	85,2	84,4	83,7	83,0	81,7	80,6	79,6	78,7	77,9	76,1	74,5	73,2	71,9	70,8	69,9	68,1	66,6	65,3	64,1	63,0
2900	93,2	92,2	91,4	90,6	90,0	89,4	88,8	88,3	87,4	86,5	85,8	85,1	84,5	83,0	81,6	80,7	79,7	78,8	78,0	76,5	75,2	74,0	73,0	72,0
3000	95,6	94,9	94,4	93,9	93,5	93,1	92,7	92,3	91,7	91,1	90,6	90,1	89,6	88,5	87,6	86,8	86,0	85,4	84,7	83,6	82,5	81,7	80,8	80,0

c) Dissoziation von Wasserdampf.
Dissoziationsgrad α in %.

Temp. °C	Teildruck des Wasserdampfes in at																							
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
1600	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38	0,35	0,32	0,30	0,29	0,28
1700	1,60	1,45	1,35	1,27	1,20	1,16	1,15	1,08	1,02	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50
1800	2,70	2,40	2,25	2,10	2,00	1,90	1,85	1,80	1,70	1,60	1,53	1,46	1,40	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86	0,83
1900	4,45	4,05	3,80	3,60	3,40	3,25	3,10	3,00	2,85	2,70	2,60	2,50	2,40	2,20	2,10	2,00	1,90	1,80	1,70	1,63	1,56	1,50	1,45	1,40
2000	6,30	5,75	5,35	5,05	4,80	4,60	4,45	4,30	4,00	3,80	3,65	3,55	3,40	3,15	2,95	2,80	2,65	2,57	2,50	2,40	2,30	2,20	2,10	2,00
2100	9,35	8,55	7,95	7,50	7,10	6,80	6,55	6,35	6,00	5,70	5,45	5,25	5,10	4,80	4,55	4,30	4,10	3,99	3,70	3,55	3,40	3,25	3,10	3,00
2200	13,4	12,3	11,5	10,8	10,30	9,90	9,60	9,30	8,80	8,35	7,95	7,65	7,40	6,90	6,50	6,25	5,90	5,65	5,40	5,10	4,90	4,70	4,55	4,40
2300	17,5	16,0	15,9	15,0	14,35	13,75	13,3	12,9	12,2	11,6	11,0	10,75	10,40	9,65	9,10	8,75	8,40	8,00	7,70	7,30	6,95	6,70	6,45	6,20
2400	24,4	22,5	21,0	20,0	19,1	18,4	17,7	17,2	16,3	15,6	15,0	14,4	13,9	13,0	12,25	11,70	11,20	10,80	10,45	9,90	9,60	9,00	8,70	8,40
2500	30,9	28,5	26,8	25,6	24,5	23,5	22,7	22,1	20,9	20,0	19,3	18,6	18,0	16,8	15,9	15,2	14,6	14,1	13,7	12,9	12,3	11,7	11,3	11,0
2600	39,7	37,1	35,1	33,5	32,1	31,0	30,1	29,2	27,8	26,7	25,7	24,8	24,1	22,6	21,5	20,5	19,7	19,1	18,5	17,5	16,7	16,0	15,5	15,0
2700	47,3	44,7	42,6	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,2	33,0	31,8	30,8	29,9	28,2	26,8	25,7	24,8	24,0	23,3	22,1	21,1	20,3	19,6	19,0
2800	57,6	54,5	52,2	50,3	48,7	47,3	46,1	45,0	43,2	41,6	40,4	39,3	38,3	36,2	34,6	33,3	32,2	31,1	30,2	28,8	27,6	26,6	25,8	25,0
2900	65,6	62,8	60,5	58,6	56,9	55,5	54,3	53,2	51,3	49,7	48,3	47,1	46,0	43,7	41,9	40,5	39,2	38,1	37,1	35,4	34,1	32,9	31,9	31,0
3000	72,9	70,6	68,5	66,7	65,1	63,8	62,6	61,6	59,6	58,0	56,6	55,4	54,3	51,9	50,0	48,4	47,0	45,8	44,7	42,9	41,4	40,1	39,0	38,0

18. Verdampfungswärme.

a) Begriff.

Die Verdampfungswärme r eines flüssigen Stoffes gibt die Anzahl kcal an, die benötigt werden, um 1 kg dieser Flüssigkeit bei gleichbleibendem äußerem Druck in Dampf von gleicher Temperatur umzuwandeln. Diese Wärmemenge ist gleich aber von entgegengesetztem Vorzeichen wie die Kondensationswärme. Die Angabe der Verdampfungswärme erfolgt zumeist bei der Siedetemperatur der Flüssigkeit unter normalem Druck.

Verdampfungswärme des Wassers bei 100° und 760 Torr:

$$r = 539 \text{ kcal/kg.}$$

Allgemeine Formel für die Berechnung der Verdampfungswärme des Wassers für Drücke bis 200 at und Temperaturen bis zu 365° (nach PTR):

$$r = \left[a + b \left(\frac{\vartheta}{100} \right)^{1.15} + c \left(\frac{\vartheta}{100} \right)^{6.5} + d \left(\frac{\vartheta}{100} \right)^{30} \right] \cdot (\vartheta_k - \vartheta)^{0.365} \text{ kcal/kg.}$$

ϑ = Verdampfungstemperatur in °C $b = 0,8162$,

$\vartheta_k = 374,2^\circ$ (kritische Temperatur d. Wass.). $c = -1,375 \cdot 10^{-3}$

$a = 68,596$ $d = -0,02 \cdot 10^{-15}$

b) Verdampfungswärme verschiedener Gase¹⁾.

Gas	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C	Verdampfungswärme kcal/kg	bei °C
Ammoniak	— 78	— 33,4	330	— 33,4
Argon	— 190	— 186	37,6	— 186
Cyanwasserstoff	— 13	+ 26,5	226	+ 26,5
Helium	— 272 (26 at)	— 269	6	— 269
Kohlendioxyd	— 57	— 78	137 (fest)	— 78
Kohlenoxyd	— 207 (100 mm)	— 190	50,5	— 190
Phosgen	— 126	+ 8	—	—
Sauerstoff	— 218,8	— 182,97	50,9	— 183
Schwefeldioxyd	— 73	— 10	96	— 10
Schwefelwasserstoff	— 83	— 60	132	— 60
Stickstoff	— 210,5	— 195,5	47,7	— 195,5
Wasserstoff	— 257	— 253	114	— 253

¹⁾ Vgl. ferner Zahlentafel IIa auf S. 13.

c) Verdampfungswärme verschiedener organischer Stoffe
(in kcal/kg bei Siedetemperatur).

Flüssigkeit	Verdampfungswärme kcal/kg	Flüssigkeit	Verdampfungswärme kcal/kg
Äthyläther	84,5	Mesitylen	74,4
Äthylalkohol	216,4	Methylalkohol	65,7
Benzin	90	Methylchlorid	97
Benzol	94,9	Naphthalin	75,4
Chloroform	61,2	n-Pentan	84
Cyklohexan	86,7	Pyridin	102
Heptan	74	Toluol	86,2
n-Hexan	79	Xylole	81—82,5
Kresol	100		

d) Verdampfungswärme von Steinkohlenteerölfraktionen.
(Nach Weiß, Ind. Eng. Chem. 14, 72, 1922.)

Siedebereich °C	Verdampfungswärme kcal/kg	Siedebereich °C	Verdampfungswärme kcal/kg
200—250	84,8	345—390	73,3
250—300	81,0	390—440	65,1
300—345	75,1	440—490	63,1

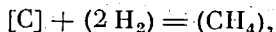
19. Bildungswärme.

a) Begriff.

Die Bildung einer chemischen Verbindung nach einer Reaktionsgleichung ist mit einer bestimmten Wärmetönung, der Bildungswärme des Stoffes, verbunden, die, wenn nicht anders angegeben, auf Zimmertemperatur (20°) bezogen wird. Eine direkte Bestimmung der Wärmetönung einer chemischen Reaktion ist jedoch nur zuweilen möglich, sie kann aber über andere Reaktionen unter Zugrundelegung des Heßschen Wärmesatzes berechnet werden. Dabei ist der Zustand der Reaktionsteilnehmer (fest, flüssig, gasförmig) zu berücksichtigen.

Die Bildungswärmen der einfacheren anorganischen und der organischen Verbindungen werden im allgemeinen auf die sie aufbauenden Elemente bezogen, deren Verbrennungswärmen mit hinreichender Genauigkeit bekannt sind.

Ein Beispiel soll dies näher erläutern. Es ist zu berechnen die Bildungswärme des Methans aus seinen Elementen, also gemäß der Gleichung



worin zwecks Kennzeichnung des Zustandes der einzelnen Stoffe die festen und flüssigen in eckige, die gasförmigen in runde Klammern gefaßt werden. Als Kohlenstoffmodifikation wird β -Graphit, als Wasser-

stoff molekularer gasförmiger Wasserstoff zugrunde gelegt. Die molare Verbrennungswärme des Methans beträgt 212800 kcal/kmol, die Summe der Verbrennungswärmen des β -Graphits + Wasserstoffs $94300 + 2 \cdot 68350 = 231000$ kcal/kmol, sie ist also um 18200 kcal/kmol größer als die des Methans. Für die Bildung des Methans aus seinen Elementen werden somit, auf Zimmertemperatur bezogen, 18200 kcal/kmol frei.

b) Bildungswärme verschiedener Stoffe.

Stoff	Formel	Entstanden ¹⁾ aus	Bildungswärme kcal/kmol
Sauerstoff	O ₂	2 (H)	+ 120000
Stickstoff	N ₂	2 (N)	+ 207500
Wasserstoff	H ₂	2 (H)	+ 105000
Wasser (flüssig)	H ₂ O	(H ₂) + 1/2 (O ₂)	+ 68350
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	[S _{rh}] + (H ₂)	+ 4760
Schwefeldioxyd	SO ₂	[S _{rh}] + (O ₂)	+ 70900
Schwefeltrioxyd	SO ₃	(SO ₂) + 1/2 (O ₂)	+ 33700
Ammoniak	NH _{3aq}	1/2 (N ₂) + 3/2 (H ₂)	+ 19350
Kohlenoxyd	CO	[\beta-Graphit] + 1/2 (O ₂)	+ 26600
Kohlendioxyd	CO ₂	(CO) + 1/2 (O ₂)	+ 67700
Methan	CH ₄	[\beta-Graphit] + 2 (H ₂)	+ 18200
Athan	C ₂ H ₆	(C ₂ H ₄) + (H ₂)	+ 30600
Propan	C ₃ H ₈	3 [\beta-Graphit] + 4 (H ₂)	+ 25700
Äthylen	C ₂ H ₄	2 [\beta-Graphit] + 2 (H ₂)	- 14700
Propylen	C ₃ H ₆	3 [\beta-Graphit] + 3 (H ₂)	- 7050
Azetylen	C ₂ H ₂	2 [\beta-Graphit] + (H ₂)	- 56050
Benzol (flüssig)	C ₆ H ₆	6 [\beta-Graphit] + 3 (H ₂)	- 12150
Kohlenoxysulfid	COS	[\beta-Graphit] + 1/2 (O ₂) + [S _{rh}]	+ 32700
Schwefelkohlenstoff	CS ₂	[\beta-Graphit] + 2 [S _{rh}]	+ 22600

¹⁾ Die in runde Klammern gefaßten Symbole bedeuten im gasförmigen, die in eckige Klammern gefaßten im festen Zustand.