

Fig. 5. Wärmediagramm des Wasserdampfes.

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

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

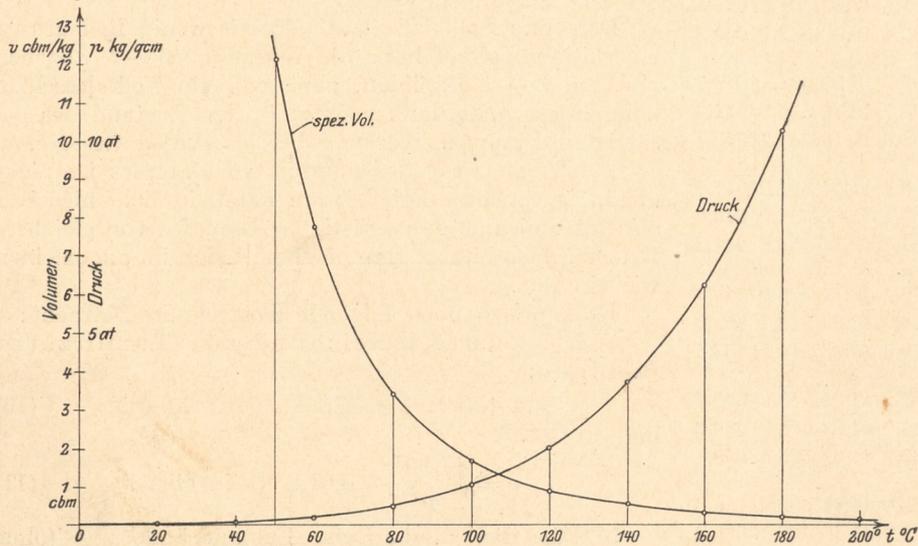


Fig. 6. Abhängigkeit von Druck und Volumen des gesättigten Dampfes von der Temperatur.

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

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

IV. Die Verbrennung.

1. Vorbemerkung.

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

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

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

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

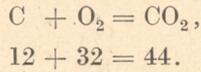
Bezeichnungen:

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

und des Verbrennungsvorganges ist jedoch die chemische Untersuchung ebenso erforderlich, wie es wichtig ist, die Zusammensetzung und auch die Temperatur der den Kessel verlassenden Heiz- bzw. Abgase zu kennen, da diese Kenntnis, wie in den folgenden Zeilen gezeigt wird, die Grundlage für die Beurteilung der wirtschaftlichen Leistung einer Feuerung bildet.

4. Die Verbrennungsluft und die Heizgase.

a) Verbrennung von Kohlenstoff zu Kohlensäure:



Auf 1 kg C ist der Sauerstoffbedarf

$$= \frac{32}{12} = \frac{8}{3} \text{ kg},$$

$$\text{der Luftbedarf} = \frac{8}{3} \cdot \frac{100}{23,2} = 11,5 \text{ kg}$$

$$\text{oder} = \frac{11,5}{1,293} = 8,9 \text{ cbm},$$

die entstandene Kohlensäure wiegt

$$= \frac{44}{12} \text{ kg}$$

$$\text{und füllt} = \frac{44}{12} \cdot \frac{1}{1,965} = 1,86 \text{ cbm},$$

der mitgeführte Luftstickstoff wiegt

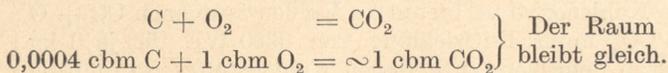
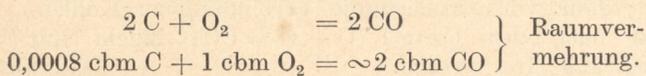
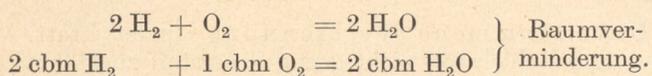
$$= \frac{8}{3} \cdot \frac{76,8}{23,2} \text{ kg}$$

$$\text{und füllt} = \frac{8}{3} \cdot \frac{76,8}{23,2} \cdot \frac{1}{1,252} = 7,07 \text{ cbm},$$

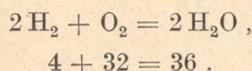
die Feuergase wiegen = 12,5 kg

$$\text{und füllen} = 8,90 \text{ cbm bei } 0^\circ \text{ C.}$$

Es ist also der Rauminhalt der Feuergase gleich dem der zugeführten Luft, was sich auch aus der Beobachtung ergibt, daß die Verbrennung nicht nur nach Gewichtsverhältnissen, sondern auch nach folgenden einfachen Raumverhältnissen vor sich geht¹⁾.



b) Verbrennung von Wasserstoff zu Wasser:



Auf 1 kg H ist der Sauerstoffbedarf

$$= 8 \text{ kg},$$

$$\text{der Luftbedarf} = 8 \cdot \frac{100}{23,2} = 34,5 \text{ kg}$$

$$\text{oder} = \frac{34,5}{1,293} = 26,5 \text{ cbm},$$

der entstandene Wasserdampf wiegt

$$= 9 \text{ kg}$$

$$\text{und füllt} = \frac{9}{0,804} = 11,2 \text{ cbm},$$

der mitgeführte Luftstickstoff wiegt

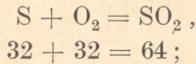
$$= 8 \cdot \frac{76,8}{23,2} = 26,5 \text{ kg}$$

$$\text{und füllt} = \frac{26,5}{1,252} = 21,2 \text{ cbm},$$

die Feuergase wiegen $34,5 + 1 = 35,5 \text{ kg}$

$$\text{und füllen } 21,2 + 11,2 = 32,4 \text{ cbm.}$$

c) Verbrennung von Schwefel zu schwefliger Säure, wie bei a) und b) berechnet:



auf 1 kg S ist der Sauerstoffbedarf also

$$= 1 \text{ kg},$$

$$\text{der Luftbedarf} = 1 \cdot \frac{100}{23,2} = 4,31 \text{ kg}$$

$$\text{oder} = \frac{4,31}{1,293} = 3,33 \text{ cbm},$$

die entstandene schweflige Säure wiegt

$$= 2 \text{ kg}$$

$$\text{und füllt} = 2 \cdot \frac{1}{2,86} = 0,7 \text{ cbm},$$

der mitgeführte Luftstickstoff wiegt

$$= 1 \cdot \frac{76,8}{23,2} = 3,31 \text{ kg}$$

$$\text{und füllt} = \frac{3,31}{1,293} = 2,56 \text{ cbm},$$

die Feuergase wiegen $2 + 3,31 = 5,31 \text{ kg}$

$$\text{und füllen } 0,7 + 2,56 = 3,26 \text{ cbm.}$$

Demnach ist die theoretische Luftmenge

$$L_{g_0} = \frac{\frac{8}{3} \text{ C} + 8 \text{ H} + \text{S} - \text{O}}{0,232} \text{ kg} \quad (15)$$

oder

$$L_{v_0} = \frac{\frac{8}{3} \text{ C} + 8 \text{ H} + \text{S} - \text{O}}{0,3} \text{ cbm} \quad (15a)$$

und die theoretische Heizgasmenge:

$$G_{g_0} = 12,5 \text{ C} + 35,5 \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 5,31 \text{ S} + \text{O} + \text{W} \text{ in kg}, \quad (16)$$

oder

$$\left. \begin{aligned} G_{v_0} &= 8,9 \text{ C} + 32,4 \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 3,26 \text{ S} + \frac{\text{O}}{1,428} \\ &+ \frac{\text{W}}{0,804} \text{ in cbm.} \end{aligned} \right\} \quad (16a)$$

Beispiel 3. Für 1 kg N-Kohle von der Zusammensetzung nach Beispiel 2 ist dann:

$$L_{g_0} = \frac{\frac{8}{3} \cdot 0,785 + 8 \cdot 0,037 + 0,015 - 0,04}{0,232} = 10,2 \text{ kg}$$

oder

$$L_{v_0} = \frac{10,2}{1,293} = 7,9 \text{ cbm};$$

$$G_{g_0} = 12,5 \cdot 0,785 + 35,5 \left(0,037 - \frac{0,04}{8} \right) + 5,31 \cdot 0,015 + 0,04 + 0,02 = 11,1 \text{ kg};$$

$$G_{v_0} = 8,9 \cdot 0,785 + 32,4 \left(0,037 - \frac{0,04}{8} \right) + 3,26 \cdot 0,015 + \frac{0,04}{1,428} + \frac{0,02}{0,804} = 8,1 \text{ cbm.}$$

¹⁾ W. Schüle, Technische Wärmemechanik, S. 27.

¹⁾ 0,804 spez. Gew. des überhitzten Dampfes reduziert auf 0° C. 760 mm Q. S.

5. Der wirkliche Luftbedarf und die wirkliche Verbrennungsgasmenge.

Mit einer Luftmenge gleich der theoretischen kann eine vollkommene Verbrennung nicht erreicht werden, da eine so enge Mischung von Brennstoff und Verbrennungsluft, daß jedes Molekül Sauerstoff mit einem Molekül C, H oder S in Berührung kommt, nicht möglich ist. Es muß daher die Luft immer im Überschuß zugeführt werden.

Die wirkliche Luftmenge ist $L = n L_0$, worin $n = 1,25$ bis 2 ist. Da nun mit dem Luftüberschuß die Höhe der Verbrennungstemperatur abnimmt, die mit den Abgasen bei gleicher Fuchstemperatur verlorene Wärmemenge aber zunimmt, so sollte der Feuerungsbetrieb so geregelt werden, daß nicht mehr Luft zugeführt wird, als zu einer möglichst vollständigen Verbrennung gerade erforderlich ist.

Es ist daher wichtig, daß man aus dem Gehalt der Rauchgase an Kohlensäure oder an Sauerstoff die Größe des Luftüberschusses und aus dem Gehalt an Kohlenoxyd den Grad der Vollständigkeit der Verbrennung bestimmen kann (s. Abschn. XXI).

a) Bestimmung von n nach dem Sauerstoffgehalt.

Als Sauerstoffgehalt der Verbrennungsgase seien o v. H. gemessen.

Vor der Verbrennung ist:

die Luftmenge $L = n \cdot L_0$ cbm, davon $\frac{21}{100} \cdot L$ cbm Sauerstoff.

Nach der Verbrennung ist:

die Rauchgasmenge $G = n \cdot L_0$ cbm, davon noch $\frac{o}{100} L$ cbm Sauerstoff und $\frac{21-o}{100} L$ cbm Kohlensäure, die gesamte zugeführte Sauerstoffmenge beträgt

$$\frac{21}{100} L \text{ cbm,}$$

die verbrauchte Sauerstoffmenge beträgt $\frac{21-o}{100} L$ cbm, diese ist aber gleich der in der theoretischen Luftmenge

enthaltenen Sauerstoffmenge $\frac{21}{100} L_0$, also

$$\frac{21-o}{100} L = \frac{21}{100} L_0,$$

woraus folgt

$$n = \frac{L}{L_0} = \frac{21}{21-o}. \quad (17)$$

b) Bestimmung von n aus dem Kohlensäuregehalt.

Es sei der Kohlensäuregehalt zu k v. H. des Rauchgasvolumens bestimmt. Aus den vorstehenden Ausführungen geht nun hervor, daß, bezogen auf gleichen Druck und gleiche Temperatur, das Rauchgasvolumen ungefähr gleich dem Luftvolumen ist, und daß bei der Verbrennung an die Stelle des verbrauchten Sauerstoffvolumens ein gleich großes Kohlensäurevolumen tritt.

Bei der Verbrennung von 1 kg C mit der Luftmenge L beträgt das CO_2 -Volumen

$$\frac{k}{100} \cdot L = \frac{k}{100} \cdot n \cdot L_0 \text{ cbm};$$

dies ist aber gleich demjenigen, welches auch bei der theoretischen Luftmenge entwickelt wäre, also gleich

$$\frac{k_{\max}}{100} L_0 = \frac{21}{100} \cdot L_0,$$

somit folgt aus

$$\frac{21}{100} L_0 = \frac{k}{100} \cdot n L_0, \quad n = \frac{21}{k}. \quad (18)$$

Für praktische Ausführungen rechnet man mit folgenden Werten von n :

für Steinkohlenfeuerungen:

Planrost mit Handbeschiebung . . .	$n = 1,6$ bis $1,9$
„ „ „ mechan. Beschiebung . . .	$n = 1,4$ „ $1,75$
Schrägrost und Stufenrost	$n = 1,3$ „ $1,6$
für Braunkohlenfeuerungen	$n = 1,3$ „ $1,5$
„ Gasfeuerungen	$n = 1,15$ „ $1,3$
„ flüssige Brennstoffe	$n = 1,2$ „ $1,4$

Ist nun C der Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes, so liefert

$$1 \text{ kg Brennstoff } 1,86 \cdot C = \frac{C}{0,536} \text{ cbm Kohlensäure}$$

und dementsprechend, d. h. ohne Beachtung von Wasserstoff und Wasserdampf,

$$\frac{C}{0,536 \cdot k} \text{ cbm Rauchgase}$$

bei n facher theoretischer Luftmenge.

Nun fällt ein Teil des Brennstoffes unverbrannt durch die Rostspalten. Wenn man diesen Anteil C_r , der bei der Analyse der Herdrückstände festgestellt werden kann und etwa 2 bis 3 v. H. beträgt, berücksichtigt, so ist für den wirklich verbrannten Kohlenstoff anstatt C

$$C' = C - C_r$$

zu setzen.

Ferner kommen als Rauchgas bildende Bestandteile noch H und W in Betracht, während man sonst etwa vorkommende Gase in bezug auf die Rauchgasmenge vernachlässigt.

Dann ist die wirkliche Gasmenge bei der Verbrennung von 1 kg Brennstoff

$$G_v = \frac{C'}{0,536 \cdot k} + \frac{9H + W}{0,804} + 21,2 \cdot H \text{ [in cbm.]} \quad (19)$$

Rauchgase durch Verbrennung von C Wasserdampf Luftstickstoff infolge Verbrennung von H

In den Normen für Leistungsversuche²⁾ heißt die Formel mit Auslassung des letzten Gliedes

$$G_v = \frac{C'}{0,536 \cdot k} + \frac{9H + W}{0,804} \text{ cbm.} \quad (19a)$$

Beispiel 4. Nehmen wir mit der N-Kohle eine Verbrennung mit $k = 13$ v. H. CO_2 -Gehalt an, ferner $C_r = 2,5$ v. H., so daß

$$C' = 0,785 - 0,025 = 0,76$$

wird, so ist:

$$G_v = \frac{0,76}{0,536 \cdot 0,13} + \frac{9 \cdot 0,037 + 0,02}{0,804} + 21,2 \cdot 0,037 = 10,9 + 0,44 + 0,785 = 12,13 \text{ cbm.}$$

Für einen CO_2 -Gehalt von 21 v. H., d. h. Verbrennung ohne Luftüberschuß ergibt die Gleichung $G_v = 7,95$ cbm,

1) $\frac{8H \cdot 76,8}{23,2} \cdot \frac{1}{1,252} = 21,2 H$.

2) Normen für Leistungsversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen, aufgestellt vom Verein deutscher Ingenieure, dem internationalen Verband der Dampfkesselüberwachungsvereine und dem Verein deutscher Maschinenbauanstalten im Jahre 1900. (Der teilweise Abdruck dieser Normen befindet sich in Abschn. XXIII.)

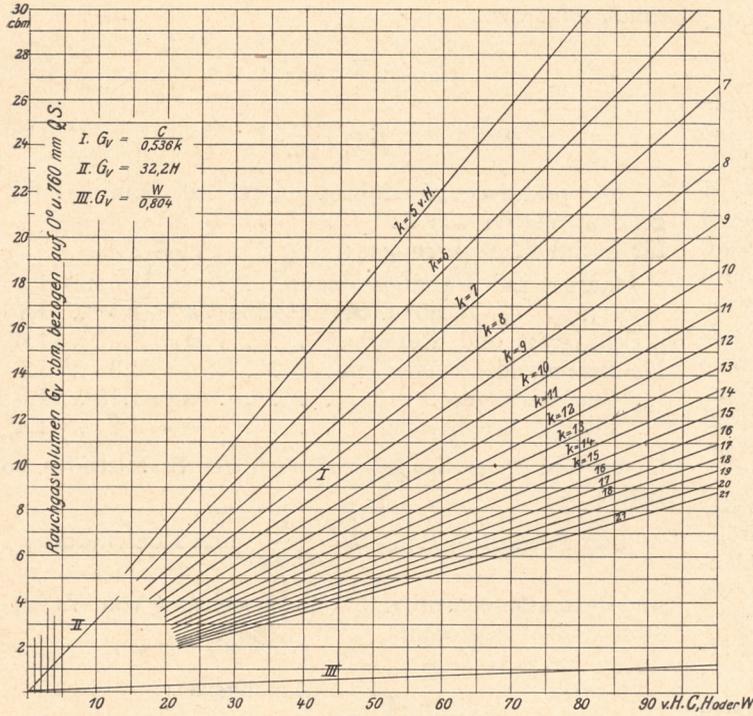


Fig. 7. Ermittlung des Rauchgasvolumens aus den Bestandteilen des Brennstoffes.

also einen etwas kleineren Wert, als nach Gl. (16a) ermittelt.

Da die Ermittlung der Gasmengen, die bei einem gegebenen Brennstoff und bei bestimmtem CO₂-Gehalt der Rauchgase zu erwarten sind, eine häufig vorkommende Aufgabe ist, so sei im folgenden ein einfaches Verfahren angegeben, welches die Gasmengen aus einem Schaubild abzugreifen gestattet.

Gl. (19) läßt sich, etwas umgeformt, in folgender Weise schreiben:

$$G_v = \frac{C'}{0,536 \cdot k} + 32,2 H + \frac{W}{0,804}; \quad (19b)$$

es sind nun in Fig. 7 die den verschiedenen C-, H- und W-Gehalten entsprechenden Einzelgasmengen als gerade

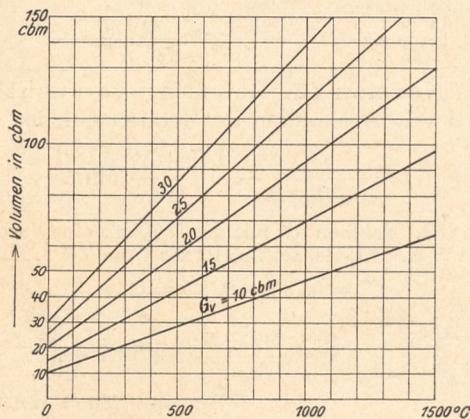


Fig. 8. Volumenzunahme der Gase bei Temperaturerhöhung.

Linien aufgetragen, so daß man mit dem Greifzirkel die Summierung vornehmen kann. Für H ist die Linie nur bis zur 10 v. H.-Ordinate gezogen, da Wasserstoffgehalte über 5 v. H. selten vorkommen; für C sind mehrere Linien entsprechend dem wechselnden CO₂-Gehalt gezogen.

Man erkennt den geringen Einfluß von H und den fast verschwindenden von W.

Das Gasvolumen G_v bezieht sich auf 0° C und 760 mm; da es ebenfalls mitunter erwünscht ist, die bei bestimmten Temperaturen wirklich vorhandenen Volumen zu kennen, so sind dieselben in Fig. 8 für verschiedene Anfangsvolumen aufgetragen.

6. Temperaturen und Wärmeverluste bei der Verbrennung.

Jeder Stoff bedarf zur Einleitung der Verbrennung einer gewissen Temperatur, der Zündungstemperatur; dieselbe beträgt bei C rund 700° C, bei H über 500° C, bei CO rund 300° C.

Um die Verbrennungstemperatur t_{g1} zu ermitteln, braucht man nur den Heizwert h , die Gewichtsmengen der auf 1 kg des Brennstoffes entwickelten Heizgasbestandteile $G_1, G_2, G_3 \dots$ und die zugehörigen spez. Wärmen $c_1, c_2, c_3 \dots$, und zwar als Mittelwerte des Temperaturabstandes, zu kennen. Dann ist, wenn die Temperatur der Verbrennungsluft zu $t = 0^\circ$ angenommen wird, die theoretische Verbrennungstemperatur

$$t_{g1} = \frac{h}{G_1 \cdot c_1 + G_2 \cdot c_2 + G_3 \cdot c_3 \dots} \quad (20)$$

Danach würde sich bei der Verbrennung von Kohlenstoff in reinem Sauerstoff eine Temperatur $t_{g1} = 4500^\circ C$, bei Verbrennung in Luft ohne Überschub $t_{g1} = 2200^\circ C$ ergeben.

Diese Ermittlung leidet an einer gewissen Unsicherheit und Umständlichkeit wegen der wechselnden Luftmengen und Zusammensetzungen der Gase, der veränderlichen spez. Wärmen, und weil bei höheren Temperaturen Dissoziationen (Zersetzungen von Verbindungen, die eben durch die Verbrennung gebildet waren) auftreten. Die berechneten Temperaturen werden aus den genannten Gründen auch nicht annähernd erreicht. Die wirklichen Temperaturen werden daher beim Kesselbetrieb allgemein durch Messung mit Thermometern für Temperaturen bis 500° C und Thermoelementen für höhere Temperaturen festgestellt.

Für Überschlagsrechnungen betrachten wir die Heizgase, als ob sie nur aus Verbrennungsprodukten von C beständen, und nehmen eine konstante spez. Wärme $c_p = 0,32$, bezogen auf 1 cbm, an. Tatsächlich wird c_p höher sein, da der Wasserdampf nicht berücksichtigt ist; die Schwankungen von c_p mit wachsenden Temperaturen betragen etwa nur 0,006 bis 0,008 für je 100° Temperaturunterschied; ferner bleibt die wirkliche Verbrennungstemperatur unter der theoretischen infolge von Verlusten durch unvollkommene Verbrennung, durch Wärmeleitung und -strahlung. Besonders bei Innenfeuerungen ist anzunehmen, daß ein nicht unerheblicher Teil der Wärme sofort durch Strahlung von den Flammröhrenwänden aufgenommen wird.

Alle diese Umstände seien durch Annahme eines Faktors $\eta = 0,8$ berücksichtigt, so daß die Verbrennungstemperatur, die man nach Bunte¹⁾ zweckmäßig als „Anfangstemperatur“ bezeichnet, mit Annäherung aus

$$t_{g1} = 0,8 \frac{h}{G_v \cdot 0,32} \quad (21)$$

ermittelt werden kann, worin G_v für einen beliebigen Brennstoff aus Fig. 7 zu entnehmen ist.

¹⁾ Z. Ver. deutsch. Ing. 1900, S. 669f.

Beispiel 5. Es ist für die N-Steinkohle von $h = 7300$ WE die Verbrennungstemperatur zu berechnen, wenn der CO_2 -Gehalt 13 v. H. beträgt. Die Gasmenge ist nach Beispiel 4 $G_v = 12,13$ cbm, also

$$t_{g_1} = 0,8 \frac{7300}{12,13 \cdot 0,32} = 1500^\circ \text{C}.$$

Den Wirkungsgrad, mit welchem eine Kesselanlage arbeitet, kann man aus der erzeugten Dampfmenge D in kg und deren Erzeugungswärme i WE/kg, sowie der verfeuerten Brennstoffmenge B kg und deren Heizwert h ermitteln zu

$$\eta = \frac{i D}{h \cdot B}.$$

Der Gesamtverlust einer Feuerung ist dann

$$V = h \cdot B - i D \text{ WE}.$$

Zur eingehenden Beurteilung des Betriebes, welche erst die Möglichkeit von Verbesserungen in der Führung derselben erschließt, ist die Kenntnis der einzelnen Verluste und deren Größe erforderlich.

Diese Verluste sind:

a) Der Wärmeverlust V_1 durch Unverbranntes in den Herdrückständen; dieser entsteht dadurch, daß ein Teil der Kohle unverbrannt, aber entgast, durch die Rostspalten hindurchfällt. Derselbe wird ermittelt, indem man das Gesamtgewicht der trockenen Herdrückstände feststellt und aus einer Durchschnittsprobe den Bestand an unverbrannten Teilen bestimmt, deren Heizwert man mit dem Durchschnittswert von 8100 WE/kg berechnet. Die Größe dieses Verlustes hängt von der Art des Brennstoffes, ob Stückkohle oder Grus, ab und kann durch zweckmäßige Rostbauarten begrenzt werden. Unter günstigen Verhältnissen rechnet man 2 bis 3 v. H.

b) Wärmeverlust V_2 durch unvollkommene Verbrennung.

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß Kohlenstoff C bei ungenügender Sauerstoffzuführung zu Kohlenoxyd CO verbrennt. Da dieses Gas einen Heizwert von 2440 WE hat, so gehen auf 1 kg desselben 2440 WE verloren. Ferner können auch Wasserstoff- und Kohlenwasserstoffgase unverbrannt entweichen.

Beispiel 6: Ist in den Rauchgasen unseres Beispiels ein CO-Gehalt von 1 v. H. gemessen worden, so entspricht das auf 1 kg Brennstoff einem Volumen

$$G_{\text{CO}} = 0,01 \cdot G = 0,01 \cdot 12,48 = 0,125 \text{ cbm}$$

oder einem Gewicht

$$G_{\text{CO}} = \frac{0,125}{\gamma} = \frac{0,125}{1,25} \text{ rund } 0,1 \text{ kg},$$

also 1 v. H. CO-Gehalt bedeutet in dem vorliegenden Falle

$$V_2 = 0,1 \cdot 2440 = 244 \text{ WE}$$

Wärmeverlust auf 1 kg Brennstoff oder bei 7300 WE = 3,3 v. H.

Hierzu gehört auch der Verlust durch Ruß, welcher entsteht, wenn die Flamme plötzlich abgekühlt wird und wenn Kohlenwasserstoffverbindungen bei Sauerstoffmangel verbrennen; dann verbleibt nur der Wasserstoff und der Kohlenstoff scheidet sich aus. Bei gasreichen Kohlen kann dieser Verlust V_2 recht beträchtlich sein. (Hierüber Näheres bei den rauchlosen Feuerungen.)

c) Wärmeverlust V_3 durch die Abgase.

Dieser Verlust ist von der Temperatur der Gase und von ihrer Menge abhängig.

Die Größe desselben ist gleich der Differenz des Wärmehaltes der Rauchgase bei der Temperatur t_{g_2} am Ende der Kesselheizfläche einerseits und bei der Temperatur der umgebenden Luft t_l andererseits.

Demnach könnte der Wärmeverlust für 1 kg Brennstoff berechnet werden aus

$$V_3 = G \cdot c_{p_m} (t_{g_2} - t_l), \quad (22)$$

worin G die gesamte Gasmenge in kg, c_{p_m} die mittlere spez. Wärme des Rauchgasgemisches für den Temperaturbereich zwischen t_{g_2} und t_l bedeuten.

Genauer ist es jedoch, besonders wenn die Zusammensetzung des Brennstoffes von der für die Bestimmung von c_{p_m} angenommenen stark abweicht, den Wärmehalt der Einzelgase CO_2 , N, O, H_2O zu berücksichtigen.

Mit Benutzung der Gl. (19) ergibt sich

$$V_3 = \left[0,32 \frac{G'}{0,536 k} + 0,48(9H + W) + 0,256 \cdot 26,5 H \right] (t_{g_2} - t_l) \text{ WE}; \quad (23)$$

darin ist:

- 0,32 die spez. Wärme der Verbrennungsprodukte des Kohlenstoffes bezogen auf 1 cbm, natürlich auch ein Mittelwert wegen des mit dem Luftüberschuß schwankenden Verhältnisses der drei Einzelgase CO_2 , N und O;
- 0,48 die spez. Wärme des Wasserdampfes, jedoch bezogen auf 1 kg;
- 0,256 die spez. Wärme des Stickstoffes bezogen auf 1 kg für eine mittlere Temperatur $t_g = 250^\circ \text{C}$;
- 26,5 Gewicht des bei der Verbrennung von 1 kg H mitgeführten Luftstickstoffes.

Mit Vernachlässigung des dritten Summanden in der Klammer lautet die Formel der Normen für Leistungsversuche:

$$V_3 = \left[0,32 \frac{G}{0,536 k} + 0,48(9 \cdot H + W) \right] (t_{g_2} - t_l) \text{ WE}. \quad (23a)$$

Diese allgemein verwendete Formel gibt den Verlust V_3 bei der in unserem Beispiel gewählten Kohle mit $H = 0,037$ um durchschnittlich $\frac{1}{2}$ v. H. geringer an als Gl. (23). Bei größerem Wasserstoffgehalt nimmt dieser Unterschied natürlich zu.

Aus Gl. (22) bis (23a) geht hervor, daß bei gemessener Temperatur t_{g_2} der Wärmeverlust V_3 aus dem CO_2 -Gehalt bestimmt werden kann, weshalb in gut eingerichteten Kesselanlagen Apparate zur Temperaturmessung und CO_2 -Bestimmung, teilweise selbsttätig arbeitende und registrierende, vorhanden sind.

Beispiel 7. Bei der N-Kohle sei ein CO_2 -Gehalt $k = 0,13$ und eine Fuchstemperatur $t_{g_2} = 300^\circ \text{C}$ bei 20°C im Kesselhause gemessen. Dann ist nach Gl. (23):

$$V_3 = \left[0,32 \frac{0,76}{0,536 \cdot 0,13} + 0,48(9 \cdot 0,037 + 0,02) + 0,256 \cdot 26,5 \cdot 0,037 \right] (300 - 20) = 1093 \text{ WE oder } 15 \text{ v. H. von } 7300 \text{ WE};$$

und nach Gl. (23a):

$$V_3 = \left[0,32 \frac{0,785}{0,536 \cdot 0,13} + 0,48(9 \cdot 0,037 + 0,02) \right] (300 - 20) = 1055 \text{ WE oder } 14,5 \text{ v. H.}$$

Der Unterschied beträgt 38 WE oder $\frac{1}{2}$ v. H.

Für die mehrfach erwähnte N-Kohle von $h = 7300$ WE sind die Wärmeverluste durch Abgase für wechselnden CO_2 -Gehalt derselben und für die Temperaturdifferenzen $t_{g_2} - t_l$, d. h. zwischen Fuchs- und Kesselhaustemperatur, von 100° bis 350° nach Gl. (23) berechnet und in Zahlentafel Nr. 4 und in der Fig. 9 dargestellt.

Zahlentafel Nr. 4.

Kohlensäuregehalt der Abgase in v. H. $k =$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Luftüberschußverhältnis $n = \frac{L}{L_0} \infty$	10,5	7	5,25	4,25	3,5	3	2,6	2,3	2,1	1,9	1,75	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,16	1,1	1,05	1	
Wärmeverlust V_3 durch die Abgase in v. H. des Heizwertes nach Gl. (23) bei Temperaturdifferenzen $t_{g_2} - t_1 =$	100°	31,6	21,3	16,1	13	10,9	9,5	8,4	7,5	6,8	6,2	5,7	5,4	5	4,7	4,5	4,2	4	3,8	3,7	3,5
	150°	47,5	32	24,2	19,5	16,4	14,2	12,5	11,2	10,2	9,3	8,6	8	7,5	7	6,7	6,3	6	5,7	5,5	5,3
	200°	63,2	42,6	32,2	26	21,8	18,9	16,7	15	13,6	12,4	11,5	10,7	10	9,4	8,9	8,4	8	7,6	7,3	7
	250°	79	53,3	40,3	32,5	27,3	23,7	20,9	18,7	17	15,5	14,3	13,4	12,5	11,7	11,1	10,5	10	9,6	9,2	8,8
	300°	95	63,9	48,3	39	32,7	28,4	25	22,4	20,4	18,6	17,2	16	15	14,1	13,4	12,7	12	11,5	11	10,5
	350°	∞	74,5	56,4	45,6	38,2	33,1	29,3	26,2	23,8	21,7	20	18,7	17,5	16,4	15,6	14,8	14	13,4	12,8	12,3

Die Zahlentafel und Fig. 9 zeigen, wie groß bei einer Dampfkesselfeuerung die Wärmeverluste sein können, wie groß sie andererseits nur zu sein brauchen, und daß eine Verringerung des Luftüberschusses unter $n = 1,2$ oder $1,1$ in bezug auf den Wirkungsgrad nicht mehr von erheblicher Bedeutung ist. Dagegen wächst mit Abnahme von n die Gefahr der unvollkommenen Verbrennung.

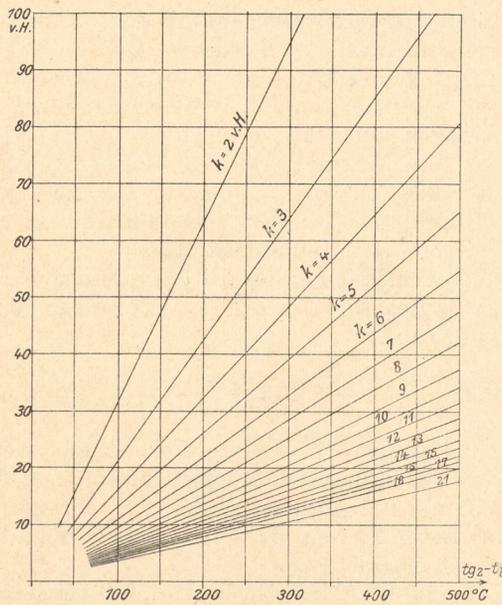


Fig. 9. Wärmeverluste V_3 durch die Rauchgase.

Die Zahlentafel zeigt ferner die Abhängigkeit von der Temperatur t_{g_2} . Die untere Grenze für t_{g_2} ist dadurch gegeben, daß ein gewisser Unterschied zwischen der Temperatur der Abgase und der Kesselheizfläche vorhanden sein muß, wenn ein Wärmeübergang bei einer noch wirtschaftlichen Größe der Heizfläche stattfinden soll, und daß dieser Unterschied ebenfalls zur Erzeugung des natürlichen Schornsteinzuges erforderlich ist.

Ist nun in den Abgasen vor dem Schornstein ein Speisewasservorwärmer (Economiser) eingebaut, so wird hierdurch die Temperatur der Gase je nach der Temperatur des Speisewassers und der Größe der Vorwärmerheizfläche ermäßigt.

Treten z. B. die Abgase mit 300°C an den Vorwärmer und verlassen sie denselben mit 180°C , so sind auf 1 kg Brennstoff obiger Zusammensetzung bei Verbrennung mit $k = 13$ v. H. CO_2 -Gehalt, nach Gl. (23) berechnet, 470 WE an den Vorwärmer abgegeben, das sind

$$\frac{470}{7300} \cdot 100 = 6,5 \text{ v. H.}$$

der in der Kohle enthaltenen Wärme. Bei manchen Schiffskesseln wird auch die in den Abgasen enthaltene Wärme zur Vorwärmung der Verbrennungsluft nutzbar gemacht.

d) Schließlich kommen noch als Wärmeverlust V_4 diejenigen Wärmemengen in Betracht, welche durch Leitung und Strahlung verloren gehen. Die Größe dieses Verlustes ermittelt man angenähert aus der Größe der ausstrahlenden Fläche des Kessels F in qm der Differenz Δt zwischen der Temperatur der äußeren Umfassungswände und der umgebenden Luft und der Wärmeübergangszahl k , für welche de Grahl¹⁾ durch Versuche an einem allseitig freistehenden Kessel den Wert 13 ermittelt hat.

Danach ist

$$V_4 = k \cdot F \cdot \Delta t \text{ WE.} \tag{24}$$

Bei Aufstellung einer Wärmebilanz werden ermittelt:

1. die von den Heizgasen an den Dampfkessel und ev. an Überhitzer und Vorwärmer abgegebenen Wärmemengen;
 2. der Verlust durch Unverbranntes in den Herdrückständen V_1 ;
 3. der Verlust durch den Wärmehalt der Abgase V_3 .
- Der Unterschied zwischen dem Heizwert und diesen drei Wärmemengen wird dann häufig als Restverlust in Rechnung gestellt.

Ist z. B.:

die an Kessel, Überhitzer und Vorwärmer abgegebene Wärmemenge 78 v. H.
 der Verlust durch Unverbranntes in den Herdrückständen 4 v. H.
 der Verlust durch die Abgase 12 v. H.
 so beträgt der Restverlust 6 v. H.
 100 v. H.

Bei genauen Versuchen werden jedoch die Verluste durch Leitung und Strahlung, durch Ruß und durch unverbrannte Gase einzeln festgestellt und als Restverlust nur die Wärmemengen bezeichnet, die nicht nachgewiesen werden konnten.

Durch Versuche, die seit einer Reihe von Jahren durch den Verein für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung in Hamburg ausgeführt werden, ist nachgewiesen, daß der Verlust infolge von Ruß hinter demjenigen durch unverbrannte Gase in der Regel erheblich zurücktritt und daß ferner, bei gasreichen Kohlen, mit der Verminderung des Rauches nicht immer eine Verbesserung der Brennstoffausnützung verbunden ist, sondern infolge vermehrten Luftüberschusses auch eine Verschlechterung eintreten kann.

Allerdings ist die Entwicklung von starkem Rauch schon ein Zeichen dafür, daß auch größere Mengen unverbrannter Gase mit entweichen.

Über den Einfluß der flüchtigen Bestandteile fester Brennstoffe auf den Wirkungsgrad von Kesselanlagen mit Innenfeuerung haben Constam und Schläpfer²⁾

¹⁾ Zeitschr. f. Dampf- u. Maschinenbetriebe 1909, Nr. 51.
²⁾ Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ing. 1909, S. 1837 ff.

ausführliche Versuche gemacht und gefunden, daß bei Planrosten mit Handbeschickung und natürlichem Zug mit Brennstoffen mit 16 bis 23 v. H. flüchtigen Bestandteilen die besten Wirkungsgrade zu erzielen waren; daß die Brennstoffausnützung jedoch mit zunehmendem Gasreichtum der Kohlen abnahm und zwar hauptsächlich infolge der Verluste durch unverbrannte Gase und Ruß, verursacht durch den Luftmangel kurz

nach dem Beschicken. Bessere Wirkungsgrade wurden mit mechanischer Rostbeschickung (Unterschubfeuerung) erzielt. Infolge der gleichmäßigen Brennstoffzufuhr und des durch Druckluft bewirkten reichlicheren Luftüberschusses war der Verlust durch unvollkommene Verbrennung bei solcher Feuerung auch bei gasreichen Kohlen gering, während allerdings der Verlust V_3 durch Abgase gestiegen war.

V. Die Brennstoffe.

1. Entstehung.

Alle Brennstoffe sind Ergebnisse organischen Lebens gegenwärtiger oder lang vergangener Zeiträume und leiten als solche ihren Ursprung von der Sonnenenergie her.

Während Holz und Torf noch heute gebildet werden, liegt die Zeit der Pflanzen, aus denen sich die Steinkohle gebildet hat, ungezählte Jahrtausende zurück. Die Braunkohle ist etwas jünger. Die Umbildung der Pflanzen zu Stein- oder Braunkohlen ist unter der Einwirkung von Druck und Wärme während sehr langer Zeiten vor sich gegangen. Für das Erdöl wird die Entstehung aus tierischen Resten vorweltlicher Meere angenommen.

2. Steinkohlen.

A. Das Vorkommen.

Die Steinkohlen sind in allen Erdteilen in größeren Ablagerungen vorhanden. Sie liegen in vielen, mitunter über 100 Schichten, Flöze genannt, durch Zwischenschichten aus Schieferthon oder Sandstein getrennt, übereinander. An einigen Stellen treten die Schichten offen zutage, an anderen liegen sie über 1000 m tief unter der Erdoberfläche. Die Dicke der Schichten beträgt einige mm bis 6 m, z. B. in China. Als abbauwürdig werden zurzeit Flöze von etwa 1 m Mächtigkeit angesehen.

Als wichtigste Fundorte kommen für Deutschland in Betracht:

Das Ruhrkohlenbecken, welches sich nach Norden bis über die Lippe hinausstreckt, mit etwa 60 abbauwürdigen Flözen von 50 bis 60 m Gesamtmächtigkeit.

Das Saarkohlenbecken mit 77 Flözen von 80 m Mächtigkeit.

Das Oberschlesische Becken mit 35 abbauwürdigen Flözen von 100 m Gesamtmächtigkeit, während die Mächtigkeit einzelner Flöze 3 bis 4 m und diejenige der gesamten Formation 5000 m beträgt.

Ferner Kohlenbecken bei Aachen (Wurmrevier), Pfalz und Oberbayern, Deister, Niederschlesien und Sachsen.

B. Die Kohlenarten.

Man unterscheidet die Steinkohlen nach dem Gasgehalt in gasarme und gasreiche und nach dem Verhalten bei der Erhitzung unter Luftabschluß in:

1. Backkohle oder Fettkohle:

kleine Stücke backen zusammen;

2. Sinterkohle:

große Stücke fallen nicht auseinander, kleine Stücke backen nicht zusammen;

3. Sandkohle oder Magerkohle:

große Stücke zerspringen, kleine Stücke backen nicht zusammen.

Zahlentafel Nr. 5.

Einteilung der Steinkohlen, geordnet nach dem geologischen Alter, nach H. Wedding.

Bezeichnung	Flüchtige Bestandteile v. H.	Spez. Gew. γ	Eigenart	Verwendung
1. Gasarme Sandkohle, Anthrazit (älteste Kohle).	5—10	1,5 ÷ 1,75	Keine Flamme, erfordert lebhaften Zug.	Für Hausbrand und Schachtöfen.
2. Gasarme, alte Sinterkohle.	10—15,5	1,3	Kurze Flamme.	Für Dampfkesselfeuerungen.
3. Gasarme, a) alte b) Backkohle.	15,5—20 20—33	1,25	Die Feinkohle liefert einen festen und dabei porösen stückigen Koks.	a) Für Schmiedefeuer und zur Verkokung; b) für Leuchtgas-erzeugung.
4. Gasreiche, junge Backkohle.	33—40	1,1 ÷ 1,25	Brennt mit langer Flamme; der Grus ist schwer verkokbar.	Für Dampfkessel und Flammöfen
5. Gasreiche, junge Sinterkohle.	40—44	1,3	Lange Flamme, stark rusend.	Für Dampfkessel geeignet, erfordert aber Einrichtungen für rauchfreie Verbrennung.
6. Gasreiche, junge Sandkohle.	44—50	1,35	Desgl.	

C. Aufbereitung der Kohlen.

Die Mehrzahl aller Kohlenzechen (Gruben) besitzt eine Aufbereitungsanlage, d. h. eine Separation und Wäsche, die der größte Teil der geförderten Steinkohle passiert. Nur ein Teil der Kohle wird so, wie sie aus dem Schachte zutage gefördert wird, zum Versand gebracht. In der Separation wird die vom Förderschacht herkommende Kohle zunächst in Schwingsieben derart sortiert, daß alle unter 80—90 mm großen Stücke in einen Füllrumpf fallen, von wo sie später in die Wäsche gelangen, während die größeren Stücke auf Lesebändern den Separationsraum passieren und danach gleich zum Versand gelangen. Auf den Lesebändern erfolgt das Auslesen (Ausklauben) der größeren, für die direkte Verbrennung untauglichen Beimengungen, der sog. Berge, von Hand, während in der Wäsche die kleineren Beimengungen durch von unten in dünnere Kohlenschichten