

Die Aufstellung von Energiebilanzen für Ofen in der keramischen Industrie – Teil 1*

R. JESCHAR**, K. JUNGE**, Clausthal-Zellerfeld

Die Energetik der Verbrennung

Brennwert und Heizwert

Zum Ziel jeder Verbrennungsrechnung gehört die Ermittlung der bei der Verbrennung freiwerdenden Energie. In thermodynamischem Sinne wird diese Energie bei der Verbrennung unter konstantem Druck als Reaktionsenthalpie vom Brennstoff aufgebracht. Um ein einheitliches Meßsystem zu erhalten, ist international eine Bezugstemperatur von 25°C festgelegt, der die Temperaturen einerseits der Reaktionspartner vor der Verbrennung und andererseits der Reaktionsprodukte nach der Verbrennung gleichen. Dabei bezeichnet man die auf die Brennstoffmasse m_B bezogene, bei vollständiger Verbrennung auftretende Reaktionsenthalpie (nach einer Vorzeichenumkehr, weil nämlich $(\Delta H)_R$ negativ ist)

$$H_0 = - \frac{(\Delta H)_R}{m_B} \quad (80)$$

als „spezifischen Brennwert H_0 “.

Unter „vollständiger Verbrennung“ ist hierbei zu verstehen, daß die gesamte zur Verfügung stehende Brennstoffmenge in die Oxidationsstufen H_2O , CO_2 und SO_2 umgesetzt wird. Darüber hinaus zeichnet sich die Definition des Brennwertes dadurch aus, daß sämtliches nach der Verbrennung vorhandene Wasser in flüssigem Zustand vorliegt, so daß auch die Kondensationsenthalpie des im Verbrennungsgas enthaltenen Wasserdampfes im Brennwert enthalten ist.

Bei Ofenprozessen kann jedoch im allgemeinen die Kondensationsenthalpie nicht nutzbar gemacht werden; daher wird für verbrennungstechnische Rechnungen meistens der „spezifische Heizwert H_u “ verwendet, der sich vom Brennwert um eben diese Kondensationsenthalpie des im Verbrennungsgas enthaltenen Wasserdampfes unterscheidet und damit aus dem Brennwert H_0 folgendermaßen errechnet werden kann.

Ist h der Massenanteil des Elementes Wasserstoff im Brennstoff, so gilt mit Gleichung (34) für die Masse des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes:

$$\frac{m_{H_2O}}{m_B} = h \cdot 8,94 \frac{\text{kg Wasserdampf}}{\text{kg Brennstoff}} \quad (81)$$

* Fortsetzung aus Keram. Z. 3/80, 12/79, 10/79
** Inst. f. Wärmetechnik der Technischen Hochschule Clausthal

Die Verdampfungsenthalpie r_{25} bei der Bezugstemperatur von 25°C ist in der Gleichung (81) die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme berechnet werden:

$$r_{25} \cdot \frac{m_{H_2O}}{m_B} = h \cdot 21831 \text{ kJ/kg}$$

Definitionsgemäß gleicht der Heizwert H_u dem Brennwert H_0 abzüglich der Verdampfungsenthalpie r_{25} des Wasserdampfes:

$$H_u = H_0 - r_{25} \cdot \frac{m_{H_2O}}{m_B}$$

Durch Einsetzen erhält man:

$$H_u = H_0 - h \cdot 21831 \text{ kJ/kg}$$

so daß bei Kenntnis des Brennwertes H_0 die Heizwertanalyse (speziell des Wasserdampfes) eine einfache Berechnung ist.

Es sei an dieser Stelle ergä, daß anstelle der massenbezogenen Heizwerte häufig mit volumenspezifischen Heizwerten $H_{u,n}$ gearbeitet wird.

Die auf das Volumen des Brennstoffs bezogenen Werte $H_{0,n}$ und $H_{u,n}$ werden durch

$$H_{0,n} = \frac{H_0}{\rho_n}$$

und entsprechend

$$H_{u,n} = \frac{H_u}{\rho_n}$$

mit der Normdichte ρ_n des Brennstoffs. Die volumenspezifischen Brenn- und Heizwerte werden jedoch – insbesondere bei der Darstellung von Ofenprozessen – bevorzugt verwendet, wenn die Werte $H_{0,n}$ und $H_{u,n}$ im folgenden (jedoch in den Tabellen der

Als wichtigste kalorische Kenngrößen sind die spezifischen Brennwert $H_{0,n}$ und die unterschiedlichsten Brennwert $H_{u,n}$ angegeben. Das ist insbesondere für die verschiedenen Brennstoffen der Fall, wo

Tabelle 4 Berechnung von Brenn- und Heizwerten für ein Gasgemisch.

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|--------------------------------|---------------------|---|--|--|---|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|
| | | | Norm- dichte $\rho_{n,1}$ kg/m ³ | Vol. Anteil χ_1 m ³ /m ³ | $A_1 =$ $\chi_1 \cdot \rho_{n,1}$ kg/m ³ | $w_1 =$ $A_1 / \sum A_i$ kg/kg | Spezifischer Brennwert* | | | | Spezifischer Heizwert* | | | |
| | | | | | | | $H_{o,1}$ kJ/kg | $H_{o,1} \cdot w_1$ kJ/kg | $H_{o,n,1}$ kJ/m ³ | $H_{o,n,1} \cdot \chi_1$ kJ/m ³ | $H_{u,1}$ kJ/kg | $H_{u,1} \cdot w_1$ kJ/kg | $H_{u,n,1}$ kJ/m ³ | $H_{u,n,1} \cdot \chi_1$ kJ/m ³ |
| O ₂ | Sauerstoff | | 1,429 | | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| N ₂ | Stickstoff | | 1,250 | | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| H ₂ O | Wasserdampf | | 0,804 | | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| CO ₂ | Kohlendioxid | | 1,977 | | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| SO ₂ | Schwefeldioxid | | 2,926 | | | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| CO | Kohlenmonoxid | | 1,251 | | | | 10 110 | | 12 648 | | 10 110 | | 12 648 | |
| H ₂ | Wasserstoff | | 0,0899 | | | | 141 759 | | 12 744 | | 119 928 | | 10 782 | |
| CH ₄ | Methan | | 0,717 | | | | 55 485 | | 39 783 | | 50 005 | | 35 854 | |
| C ₂ H ₂ | Äthin (Azetylen) | | 1,175 | | | | 49 897 | | 58 629 | | 48 216 | | 56 654 | |
| C ₂ H ₄ | Äthen (Äthylen) | | 1,261 | | | | 50 295 | | 63 422 | | 47 151 | | 59 458 | |
| C ₂ H ₆ | Äthan | | 1,355 | | | | 51 865 | | 70 277 | | 47 477 | | 64 331 | |
| C ₃ H ₆ | Propen (Propylen) | | 1,914 | | | | 48 913 | | 93 620 | | 45 770 | | 87 603 | |
| C ₃ H ₈ | Propan | | 2,010 | | | | 50 337 | | 101 180 | | 46 342 | | 93 147 | |
| C ₄ H ₈ | Buten (Butylen) | | 2,597 | | | | 48 453 | | 125 830 | | 45 310 | | 117 670 | |
| C ₄ H ₁₀ | Butan | | 2,703 | | | | 49 520 | | 133 850 | | 45 740 | | 123 640 | |
| H ₂ S | Schwefelwasserstoff | | 1,536 | | | | 16 535 | | 25 400 | | 15 247 | | 23 419 | |

$$\rho_n = \underline{\hspace{2cm}} \quad H_o = \underline{\hspace{2cm}} \quad H_{o,n} = \underline{\hspace{2cm}} \quad H_u = \underline{\hspace{2cm}} \quad H_{u,n} = \underline{\hspace{2cm}}$$

* Brenn- und Heizwerte auf 25°C, 1,013 bar bezogen

rimentell bestimmt werden müssen, während man diese Werte bei Brenngasen aus der Volumenanalyse herleiten kann. Hierzu dient die Tabelle 4, die wie die Tabelle 2 (zur Berechnung der Elementaranalyse) aufgebaut ist und diese in der Nummerierung der Spalten erweitert.

Diese Tabelle 4 gleicht als Rechenschema in den Spalten 1 bis 5 exakt der Tabelle 2 und ist wie diese der Brenngaszusammensetzung entsprechend auszufüllen. Die Spalten 16 und 18 geben zeilenweise den spezifischen Brennwert der jeweiligen Gaskomponenten an, während in den Spalten 20 und 22 die spezifischen Heizwerte aufgeführt sind. Zur Bestimmung des Gemischbrennwertes multipliziert man die in Spalte 5 ermittelten Massenanteile w_i der Brenngaskomponenten mit den Einzelbrennwert der Spalte 16 und trägt die Produkte in Spalte 17 ein. Die Summe der nunmehr in Spalte 17 stehenden Werte ist der spezifische Brennwert H_o des Gemisches und wird im Fuß der Spalte eingetragen. Die Bestimmung des spezifischen Heizwertes H_u geschieht genauso, wobei jedoch jeweils zeilenweise die Spalten 5 und 20 multipliziert werden. Die Summe der dann in Spalte 21 notierten Produkte ist das gewünschte Ergebnis H_u . Will man den volumenspezifischen Brennwert $H_{o,n}$ und den volumenspezifischen Heizwert $H_{u,n}$ des Gasgemisches bestimmen, so empfiehlt sich eine analoge Vorgehensweise, wobei die in den Spalten 18 und 22 stehenden Größen jedoch mit den entsprechenden Volumenanteilen χ_i der Gaskomponenten multipliziert werden. Für die weiteren Rechnungen im Rahmen dieser Arbeit ist allerdings nur die Bestimmung des massenbezogenen, spezifischen Heizwertes H_u notwendig, der abschließend im Fuß der Spalte 21 steht.

Die so ermittelten Brenn- und Heizwerte beziehen sich auf eine Temperatur von 25°C. Da für Energiebilanzen im allgemeinen – und auch speziell in dieser Serie – als Bezugspunkt stets die Temperatur $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ gewählt wird, müßten die spezifischen Brenn- und Heizwerte auf diese Bezugstemperatur umgerechnet werden. Zwar ist diese Umrechnung nicht sehr schwierig, sie wird hier aber dennoch nicht behandelt, da die relativen Unterschiede zwischen H_u (25°C) und H_u (0°C) oder H_o (25°C) und H_o (0°C) äußerst gering sind und für technische Rechnungen sicher vernachlässigt werden können. Es sei erwähnt, daß für das in der Folge 2 vorgestellte Erdgas (Groningen) nur ein relativer Unterschied von

$$\frac{H_u(25^\circ\text{C}) - H_u(0^\circ\text{C})}{H_u(25^\circ\text{C})} \approx 0,45\% \quad (86)$$

zwischen den verschiedenen bezogenen Heizwerten besteht. Für zukünftige Rechnungen werden die Werte H_u (25°C) und H_u (0°C) daher gleichgesetzt und stets nur mit H_u bezeichnet. Für eine Reihe der wichtigsten Brennstoffe sind die Brenn- und Heizwerte in Tabelle 5 angegeben.

Die kalorische Verbrennungstemperatur

Die denkbar höchste bei einer Verbrennung erreichbare Temperatur stellt sich dann ein, wenn die Verbrennung adiabat verläuft, wenn also keine Wärme während der ablaufenden Reaktionen abgegeben wird. Diese Temperatur ist in der Praxis nicht erreichbar, da stets eine gleichzeitige Wärmeabgabe stattfindet. Es handelt sich also um eine hypothetische Grenze, die allerdings als eine wesentliche Grundlage bei der Beurteilung von Verbrennungsprozessen sowie zur Berechnung des Wärmeübergangs in Industrieöfen dient.

Setzt man voraus, daß die Verbrennung im Sinne der oben genannten Definition vollständig abläuft, daß also auch keine Dissoziation der Verbrennungsprodukte stattfindet, so spricht man von der „kalorischen Verbrennungstemperatur“. Im Gegensatz zu ihr steht die in der nächsten Folge näher anzusprechende „theoretische Verbrennungstemperatur“, die zwar ebenfalls auf der – nur theoretisch denkbaren – adiabaten Verbrennung beruht, aber eine Dissoziation der Verbrennungsprodukte bei höheren Temperaturen berücksichtigt.

Tabelle 5 Brenn- und Heizwerte einiger wichtiger Brennstoffe.

| Brennstoff | Spezifischer Brennwert | | Spezifischer Heizwert | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| | H_o in kJ/kg | $H_{o,n}$ in kJ/m ³ | H_u in kJ/kg | $H_{u,n}$ in kJ/m ³ |
| Heizöl EL (typisch) | 45 760 | — | 42 700 | — |
| Heizöl S (typisch) | 43 860 | — | 40 800 | — |
| Äthylalkohol | 29 890 | — | 26 960 | — |
| Methylalkohol | 22 310 | — | 19 510 | — |
| Benzol | 41 940 | — | 40 230 | — |
| Leichtbenzin C | 47 720 | 180 840 | 44 580 | 168 900 |
| Erdgas (Groningen, s. Folge 2) | 42 050 | 33 820 | 37 890 | 30 480 |
| Erdgas (Nordwestdeutschl., typ.) | 42 400 | 35 160 | 38 380 | 31 810 |
| Erdgas (Sowjetunion, typisch) | 48 250 | 40 000 | 43 650 | 36 200 |

Die Berechnung der kalorischen Verbrennungstemperatur beruht auf der Energiebilanz zwischen dem Brennstoff und der Verbrennungsluft einerseits und den entstehenden heißen Verbrennungsgasen andererseits. Hierzu mögen zunächst einige allgemeine Erläuterungen und Begriffsklärungen vorangestellt sein.

Da Verbrennungsvorgänge bei technischer Anwendung meistens bei konstantem Druck ablaufen, interessiert als stoffgebundene Energieform im Rahmen dieser Arbeit nur die „Enthalpie“. Diese Enthalpie ist abhängig von der Temperatur des Stoffes. Bei einer für die Angaben der Enthalpie üblichen Bezugstemperatur von 0°C gilt

$$H(\vartheta) = m \cdot c_{pm} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta} \cdot \vartheta, \quad (87)$$

wobei der Koeffizient $c_{pm} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta}$ als „mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck“ benannt wird und angibt, welche Wärmemenge im Mittel zwischen 0°C und der Temperatur ϑ aufgebracht werden muß, um 1 kg des entsprechenden Stoffes um 1 K zu erwärmen. Der Koeffizient c_{pm} ist also ein Mittelwert, der aus den sich mit der Temperatur ändernden wahren spezifischen Wärmekapazitäten in dem angegebenen Temperaturbereich errechnet wird. Somit gilt die Formel zur Mittelwertbildung:

$$c_{pm} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta} = \frac{1}{\vartheta} \cdot \int_0^{\vartheta} c_p(\vartheta) \cdot d\vartheta. \quad (88)$$

Teilt man in Gleichung (87) durch die Masse m , so erhält man mit dem Ausdruck

$$h(\vartheta) = c_{pm} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta} \cdot \vartheta \quad (89)$$

die Definition der spezifischen Enthalpie.

Die einem Verbrennungsvorgang zugeführte Energie setzt sich einerseits aus den genannten Enthalpien von Luft und Brennstoff und andererseits aus dem Heizwert* des Brennstoffes zusammen. Die abgeführte Energie besteht bei der vorausgesetzten vollständigen Verbrennung lediglich aus der Enthalpie der heißen Verbrennungsgase; denn bei der angenommenen, adiabaten Verbrennung wird keine Wärme abgegeben. Da sich aus Gründen der Energieerhaltung die zu- und abgeführte Energie gleichen, läßt sich folgende Bilanzgleichung aufstellen:

$$\begin{aligned} \dot{m}_L \cdot c_{pm,L} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_L} \cdot \vartheta_L + \dot{m}_B \cdot c_{pm,B} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_B} \cdot \vartheta_B + \dot{m}_B \cdot H_u = \\ = \dot{m}_V \cdot c_{pm,V} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_k} \cdot \vartheta_k. \end{aligned} \quad (90)$$

Hierin ist ϑ_k die kalorische Verbrennungstemperatur; der Index L steht für Luft, B für Brennstoff und V für Verbrennungsgas. Die Auflösung nach ϑ_k ergibt:

$$\vartheta_k = \frac{\dot{m}_B \cdot H_u + \dot{m}_B \cdot c_{pm,B} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_B} \cdot \vartheta_B + \dot{m}_L \cdot c_{pm,L} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_L} \cdot \vartheta_L}{\dot{m}_V \cdot c_{pm,V} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_k}}. \quad (91)$$

Kürzt man durch die Brennstoffmasse \dot{m}_B , so erhält man, da \dot{m}_V der Summe von \dot{m}_B und \dot{m}_L gleicht:

$$\vartheta_k = \frac{H_u + c_{pm,B} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_B} \cdot \vartheta_B + \lambda \cdot L_{min} \cdot c_{pm,L} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_L} \cdot \vartheta_L}{(\lambda \cdot L_{min} + 1) \cdot c_{pm,V} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_k}}, \quad (92)$$

wobei λ der Luftfaktor und L_{min} der auf die Brennstoffmasse bezogene Mindestluftbedarf in kg Luft/kg Brennstoff ist.

Häufig läßt sich die Gleichung (92) noch weiter vereinfachen. Da die Größen ϑ_B und ϑ_L nur dann wesentlich von Null verschieden sind, wenn der Brennstoff oder die Verbrennungsluft

vor der Verbrennung vorgewärmt sind, kann für Verbrennungsprozesse ohne Luft- und Brennstoffvorwärmung geschrieben werden:

$$\vartheta_k = \frac{H_u}{(\lambda \cdot L_{min} + 1) \cdot c_{pm,V} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_k}}. \quad (93)$$

Genauer ist jedoch eine Gleichung, die die Enthalpie der Verbrennungsluft nicht vernachlässigt. Dagegen bringt der Brennstoff meistens eine vergleichsweise viel geringere Masse in den Verbrennungsprozeß und ist nur äußerst selten vorgewärmt. Daher kann seine Enthalpie im Vergleich zu der der Verbrennungsluft häufig vernachlässigt werden. In solchem Fall ergibt sich als eine ausreichende Bestimmungsgleichung für die kalorische Verbrennungstemperatur:

$$\vartheta_k = \frac{H_u + \lambda \cdot L_{min} \cdot c_{pm,L} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_L} \cdot \vartheta_L}{(\lambda \cdot L_{min} + 1) \cdot c_{pm,V} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_k}}. \quad (94)$$

Hierin sind die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten zunächst noch unbekannt. Erschwerend kommt hinzu, daß der Wert $c_{pm,V} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{\vartheta_k}$ selber von der kalorischen Verbrennungstemperatur abhängt, so daß die Gleichungen (92), (93) und (94) jeweils implizit hinsichtlich ϑ_k sind und nur iterativ gelöst werden können.

Die mittlere spezifische Wärmekapazität des Verbrennungsgases, also eines Gasgemisches, läßt sich mit Hilfe der Massegehalte x_i aus den Wärmekapazitäten $c_{pm,i}$ der einzelnen Verbrennungsgaskomponenten berechnen:

$$c_{pm} = \sum_i (x_i \cdot c_{pm,i}). \quad (95)$$

Die Massegehalte der Verbrennungsgaskomponenten sind für beliebige Brennstoffe aus der Gleichung (79) der Folge 3 herleitbar. Mit dem Mindestsauerstoffbedarf

$$O_{min} = (2,66 \cdot c + 7,94 \cdot h + s - o) \text{ kg/kg} \quad (76)$$

als Rechengröße ergeben sich folgende Konzentrationen auf der Grundlage der Elementaranalyse:

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{3,66 \cdot c}{1 + 4,31 \cdot O_{min} \cdot \lambda}, \quad (96)$$

$$x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{8,94 \cdot h}{1 + 4,31 \cdot O_{min} \cdot \lambda}, \quad (97)$$

$$x_{\text{SO}_2} = \frac{2 \cdot s}{1 + 4,31 \cdot O_{min} \cdot \lambda}, \quad (98)$$

$$x_{\text{O}_2} = \frac{(\lambda - 1) \cdot O_{min}}{1 + 4,31 \cdot O_{min} \cdot \lambda}, \quad (99)$$

$$x_{\text{N}_2} = \frac{n + 3,31 \cdot O_{min} \cdot \lambda}{1 + 4,31 \cdot O_{min} \cdot \lambda}. \quad (100)$$

Tabelle 6 enthält die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten der möglichen Verbrennungsgaskomponenten und von Luft in Abhängigkeit von der Temperatur, dargestellt in Form von Approximationsgleichungen. Dabei wird der Temperaturbereich bis 2000°C jeweils durch ein Polynom angenähert, während bei Temperaturen oberhalb 2000°C jeweils eine logarithmische Beziehung gilt. Gegenüber den häufig zu findenden tabellarischen Auftragungen der Wärmekapazitäten zeichnen sich Näherungsgleichungen insbesondere dadurch aus, daß sie leichter in Rechenprogrammen zu verwenden sind. Die maximalen relativen Abweichungen der in Tabelle 6 genannten Funktionen von den zugrunde liegenden Tabellenwerten sind in jedem Fall kleiner als 5‰, so daß man sicher eine hinreichende Genauigkeit annehmen kann.

* Hier müßte es eigentlich Brennwert heißen. Da jedoch für technische Anwendungen in in Öfen ablaufenden Prozessen die Kondensationsenthalpie des im Verbrennungsgas enthaltenen Wasserdampfes nicht zur Verfügung steht, rechnet man zweckmäßigerweise mit dem Heizwert.

Tabelle 6 Näherungsgleichungen zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärmekapazität.

| Mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{pm} \left \frac{\partial}{\partial \theta} \right _{\theta^{\circ}C}$ | | $\xi = \frac{\theta}{10000^{\circ}C}$ | |
|--|-----------------------|--|--|
| Temperaturbereich | c_{pm} in kJ/(kg·K) | c_{pm} in kJ/(m ³ ·K) | |
| O ₂ | bis 2000°C | 0,91 + 1,55 ξ - 3,21 ξ ² + 1,26 ξ ³ | 1,3 + 2,215 ξ - 4,587 ξ ² + 1,801 ξ ³ |
| | über 2000°C | 1,2719 + 0,1059 · lnξ | 1,8176 + 0,1514 · lnξ |
| N ₂ | bis 2000°C | 1,039 + 0,33 ξ + 6,758 ξ ² - 22,97 ξ ³ | 1,299 + 0,413 ξ + 8,447 ξ ² - 28,71 ξ ³ |
| | über 2000°C | 1,3615 + 0,1054 · lnξ | 1,7019 + 0,1318 · lnξ |
| CO ₂ | bis 2000°C | 0,831 + 4,897 ξ - 23,21 ξ ² + 44,34 ξ ³ | 1,643 + 9,682 ξ - 45,88 ξ ² + 87,66 ξ ³ |
| | über 2000°C | 1,4313 + 0,1207 · lnξ | 2,8297 + 0,2387 · lnξ |
| H ₂ O | bis 2000°C | 1,947 - 1,863 ξ + 72,77 ξ ² - 426,13 ξ ³ + 841,37 ξ ⁴ | 1,565 - 1,498 ξ + 58,51 ξ ² - 342,61 ξ ³ + 676,46 ξ ⁴ |
| | über 2000°C | 3,176 + 0,4685 · lnξ | 2,5535 + 0,3767 · lnξ |
| SO ₂ | bis 2000°C | 0,632 + 2,475 ξ - 11,09 ξ ² + 19,02 ξ ³ | 1,848 + 7,242 ξ - 32,45 ξ ² + 55,64 ξ ³ |
| | über 2000°C | 0,9199 + 0,0527 · lnξ | 2,6915 + 0,1541 · lnξ |
| Luft | bis 2000°C | 1,005 + 0,612 ξ + 3,893 ξ ² - 14,62 ξ ³ | 1,299 + 0,7914 ξ + 5,034 ξ ² - 18,9 ξ ³ |
| | über 2000°C | 1,335 + 0,1051 · lnξ | 1,7262 + 0,1359 · lnξ |

Die Notwendigkeit zur iterativen Bestimmung der kalorischen Verbrennungstemperatur ϑ_k wurde bereits erwähnt. Im Nenner der Gleichungen (92), (93) und (94) steht jeweils die mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{pm, v} \left| \frac{\partial}{\partial \vartheta} \right|_{\vartheta^{\circ}C}$ des Verbrennungsgases zwischen dem Bezugswert 0°C und der kalorischen Verbrennungstemperatur ϑ_k selbst. Zur Lösung ist es daher erforderlich, zunächst die Temperatur ϑ_k zu schätzen. Anhand dieses Schätzwertes wird die mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{pm, v} \left| \frac{\partial}{\partial \vartheta} \right|_{\vartheta^{\circ}C}$ in der gezeigten Weise errechnet. Dann erhält man – beispielsweise mit der Gleichung (94) – einen neuen Wert für die kalorische Verbrennungstemperatur ϑ_k , der gegebenenfalls als neuer Ausgangswert für die Bestimmung der Wärmekapazität dient.

Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis sich keine wesentlichen Änderungen mehr ergeben. Die nächste Folge wird die theoretische Verbrennungstemperatur behandeln. Außerdem wird anhand der beiden in der Folge 2 vorgestellten Beispiele – leichtes Heizöl und Erdgas – eine Gegenüberstellung von theoretischer und kalorischer Verbrennungstemperatur vorgenommen. Als Abschluß von Teil 1 dieser Serie, also der Beschreibung des Verbrennungsprozesses, wird die Anwendung von h - ϑ -Diagrammen für die Verbrennungsrechnung vorgestellt werden.

Druckfehlerberichtigung:

Tabelle 3 aus Heft 3/1980, Seite 134

Mindestsauerstoffbedarf: $O_{min} = (2,66 \cdot c + 7,94 \cdot h + s - o)$ kg/kg

NOVOKERAM



**nicht von gestern ...
sollte Ihre Trockenanlage sein**

**Wir modernisieren
bestehende Trocknereien**

**NOVOKERAM
die Spezialisten für Trocknung**

NOVOKERAM MAX WAGNER GMBH

8908 Krumbach / Schwb. Telefon 08282 / 3065 Telex 0539 824