

Die wärmetechnische Analyse des Kalkbrennverfahrens^{*)}

Von G. Balázsovcics, Budapest

(Bedeutung und Eigenart der Berechnung des Kalkbrennprozesses; Kritik der Berechnungsmethode von Heiligenstaedt; Analyse des Brandvorganges; Differentialgleichung der Wärmebilanz; Vereinfachung des Problems durch Vernachlässigung; vereinfachte Differentialgleichung der Wärmebilanz; Oberflächentemperatur, Oberflächenwärmebelastung, Bestimmung der zulässigen Rauchgastemperatur; das Maß des Ausbrandes; die Brandzeit; die Eigenart der Berechnung des Wärmebedarfes; theoretische und praktische Form des Reichardt-Diagrammes; die Wärmebilanz als Berechnungsbasis; das Shankey-Diagramm; Bestimmung der theoretischen Verbrennungstemperatur.)

(Importance and peculiarity of the mathematical determination of lime burning methods, criticism of Heiligenstaedt's method of calculation; analysis of the process of burning; differential equation of the balance of heat; simplification of the problem, by neglecting details; simplified differential equation of the balance of heat; temperature of surfaces, capacity of heat transfer of surface, determination of permissible temperature of furnace gas; relation between scaling loss and original volume; duration of burning; peculiarity of calculation of amount of calories needed; theoretical and practical shape of the Reichardt diagram; balance of heat as a basis for calculation; Shankey's diagram; determination of theoretical temperature of combustion.)

(L'importance et la particularité de la détermination mathématique du processus de la calcination de chaux; critique de la méthode de Heiligenstaedt; l'analyse du processus de calcination; l'équation différentielle du bilan thermique; en négligeant certains facteurs le problème sera simplifié, l'équation différentielle simplifiée du bilan thermique; la température des surfaces; capacité de la transmission de chaleur des surfaces; détermination de la température admissible des gaz de fumée; le degré de la calcination; la durée de calcination; la particularité du calcul des calories nécessaires; la forme théorique et pratique du diagramme de Reichardt; le bilan thermique servant de base pour le calcul; le diagramme de Shankey, la détermination de la température théorique de combustion.)

In physikalisch-chemischer Hinsicht ist der Kalkbrennprozeß ein geklärter Vorgang, vom wärmetechnischen Gesichtspunkt aus betrachtet jedoch noch nicht.

Die Kenntnis der Vorgänge, die sich in Kalkbrennöfen tatsächlich abspielen, ist sowohl für Konstrukteure, als auch für Betriebsingenieure außerordentlich wichtig. Die sich mit diesem Aufgabengebiet befassende Fachliteratur gibt jedoch keine genaue Auskunft und es enthalten daher die jeweils angewandten rechnerischen Methoden einige prinzipielle Fehler.

Die allgemein üblichen wärmetechnischen Berechnungen können in zwei Punkten zusammengefaßt werden:

1. Berechnung des Brennvorganges,
2. Bestimmung des Wärmebedarfes.

1. Die Berechnung des Brennvorganges

Wie bei den wärmetechnischen Berechnungen im allgemeinen, so auch bei der Berechnung des Kalkbrennverfahrens im besonderen — wenn die Berechnung auf prinzipiell richtiger Basis erfolgen soll — muß man sich darüber im Klaren sein, daß sich zwischen den tatsächlichen Betriebsverhältnissen und den theoretischen Berechnungen stets Differenzen ergeben werden. Natürlich muß man bemüht sein, sämtliche Vorgänge, die den Prozeß beeinflussen können, bei der Berechnung zu berücksichtigen.

Sollte dies aus Gründen, wie Fehlen mathematischer Lösungsmöglichkeiten oder Undurchsichtigkeit des notwendigen Rechenganges nicht möglich sein, so muß dem Maß der Vernachlässigungen Rechnung ge-

tragen und gesorgt werden, daß sich die durch die Vernachlässigungen entstandenen Fehlerquellen größenordnungsmäßig nicht auswirken und sich die Berechnung in jedem Fall in Richtung Sicherheit bewegt.

Die Bedeutung der auf zutreffender Basis aufgebauten theoretischen Berechnungen liegt nicht nur darin, daß den Effektivwerten nahekommende, quantitativ reelle Ergebnisse geliefert werden, sondern auch in den auf Grund der Berechnung nunmehr möglichen qualitativen Folgerungen, die die Ausgestaltung der Konstruktion in großem Maße beeinflussen können.

Das Kalkbrennen kann in kontinuierlichen Betrieben, die mit modernen Schachtföfen arbeiten, in drei Phasen unterteilt werden:

1. Die Vorwärmezone, in der der Kalkstein auf einen der Dissoziationswärme des CaCO_3 nahestehenden Temperaturwert gebracht wird.
2. Die Brennzone, in der sich der eigentliche technologische Vorgang abspielt.
3. Die Kühlzone, in der der gebrannte Kalk seine Wärme an die Verbrennungsluft abgibt.

Bei der Berechnung der Vorgänge in der Vorwärm- und Kühlzone wird die in der Wärmetechnik allgemein übliche Erwärmungsformel verwendet. Für die Berechnung des Brennvorganges steht jedoch bisher kein bekannter, gangbarer Weg zur Verfügung.

Die allgemein üblichen Rechenmethoden versuchen hier die mathematischen Formeln des gewöhnlichen Erwärmungsvorganges — wenn auch mit gewissen Korrekturen — zu verwenden, um die sich hier abspielenden endothermen Reaktionen zu erfassen. Von diesen Berechnungsmethoden ist die von Heiligenstaedt angewandte noch die zuverlässigste.

^{*)} Eingesandt am 10. Jänner 1957.

Heiligenstaedt verwendet bei der Berechnung des Brennverfahrens die Formeln der einfachen Erhitzung, aber mit dem Unterschied, daß der Wert der wahren spezifischen Wärme mit dem aus dem Verhältnis der Reaktionswärme zu der Temperatur des Erhitzungsintervalles sich ergebenden Quotienten gleichgesetzt wird.

Der Zerfall des CaCO_3 geht laut Heiligenstaedt zwischen 800°C und 950°C vor sich. Daher ist, mit Rücksicht auf den Wärmebedarf der Überhitzung, die während des Brennverfahrens zu berücksichtigende spezifische Wärme:

$$c = \frac{430}{950 - 800} = 2,87 \dots \text{kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

Der Zeitraum des Ausbrennens ist

$$t = \frac{g \cdot c}{\alpha \cdot \tau} \ln \frac{\vartheta - 800}{\vartheta - 950} \dots \text{h}$$

Darin bedeuten:

- ϑ Durchschnittswert der Rauchgastemperatur
- g Flächenbelastung
- α Wärmedurchgangszahl
- τ Korrekturfaktor

Hiebei ist τ eine Funktion der Werte von $\alpha/\lambda \cdot R$, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit und R der Radius des Kalksteines ist.

Aus dieser Beziehung geht hervor, daß die Leistung des Ofens bei gegebener Stückgröße durch die Vergrößerung der Wärmedurchgangszahl und durch die Erhöhung der Rauchgastemperatur zu heben ist. Außerdem ist hieraus ersichtlich, daß Rauchgastemperaturerhöhung und Leistungszuwachs nur in logarithmischer Proportion stehen, hingegen die Vergrößerung der Wärmedurchgangszahl eine intensivere Leistungssteigerung zeigt.

Diese, der Grundformel der Wärmeleitung entsprechende Rechenmethode bedingt, — obwohl Heiligenstaedt bei ihrer Verwendung keinen diesbezüglichen Hinweis gibt —, daß während des Brennverfahrens der dissoziative Vorgang des CaCO_3 in jedem Zeitpunkt, in dem sich der gesamte Rauminhalt des Kalksteines in Reaktion befindet, mit den schon gebrannten CaO -Molekülen, bezogen auf den gesamten Rauminhalt, gleichmäßig verteilt und nebeneinander angeordnet ist. Nur in diesem Fall ist es möglich, die spezifische Wärme — die im vorliegenden Fall gleich dem Quotienten aus Reaktionswärme und Erhitzungsintervall ist — im gesamten Rauminhalt des Kalksteines während des Brennvorganges als konstant zu betrachten und die üblichen Formeln des Erwärmungsvorganges anzuwenden.

Wenn wir während des Brennverfahrens durch den Kalkstein einen Schnitt führen würden, wäre es leicht zu beweisen, daß die auf den üblichen wärmetechnischen Formeln aufgebauten rechnerischen Methoden durchaus nicht dem effektiven Gang des CaCO_3 -Zerfallprozesses folgen.

Ein dem Brennverfahren ausgesetzter, aber noch nicht vollständig gebrannter Stein besteht — wie dies allgemein bekannt ist — aus einer vollkommen gebrannten CaO -Hülle und einem noch nicht gebrannten CaCO_3 -Kern.

Der Zerfall des CaCO_3 spielt sich daher an der Grenze der CaO -Hülle und des CaCO_3 -Kernes ab. Während des Brennens verschiebt sich diese Grenzschicht immer tiefer in Richtung Kalksteinmitte, bis schließlich der CaCO_3 -Kern vollkommen verschwindet.

Im Inneren der CaO -Hülle ist während des Brennens auf Grund der Reaktion $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ eine reine CO_2 -Atmosphäre vorhanden, die von ihrem Entstehungsort aus, also von der Grenzschicht, an die Oberfläche des Steines diffundiert, um dort die Konzentration des CO_2 -Gehaltes der Rauchgase zu erhöhen. Demzufolge wird die Temperatur der Grenzschicht gleich der Temperatur, bei der der CO_2 -Gasdruck im CaCO_3 den atmosphärischen Druck erreicht. Diese Temperatur beträgt etwa 895°C und wird in den weiteren Berechnungen mit 900°C angenommen.

Der Zerfall des CaCO_3 tritt auf der Oberfläche des Kalksteines schon bei Temperaturen unter 840°C ein — wie aus Abb. Nr. 1 zu ersehen ist — da die Konzentration der den Stein umhüllenden Rauchgasatmosphäre im allgemeinen einen CO_2 -Gehalt von 40% nicht erreicht. Den Beginn der Verbrennungszone können wir aber aus dem Oberflächentemperaturwert des Kalksteines von 900°C errechnen, da durch die geringe Schichtstärke der Oberflächenröstung weder der Brenn- noch der Vorwärmvorgang beeinflusst wird.

Die üblichen Berechnungsmethoden entsprechen nicht dem tatsächlichen Zerfallsvorgang des Kalksteines, wobei dies nicht der einzige Fehler dieser Berechnung ist. Ein anderer, grundlegender Fehler entsteht nach Meinung des Autors dadurch, daß bei

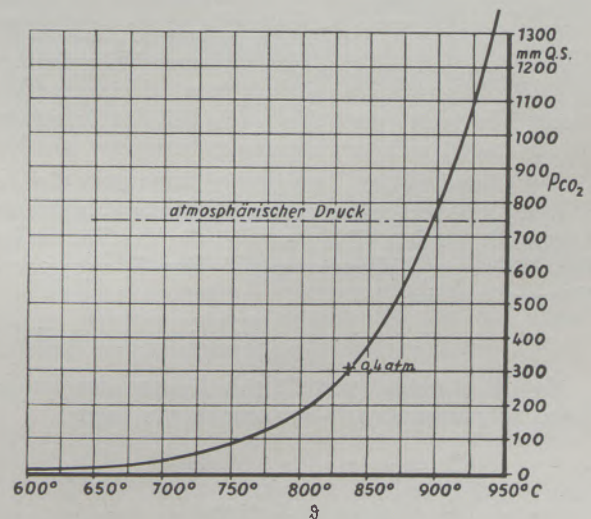


Abb. 1
Dampfdruck der CO_2 des CaCO_3 als Funktion der Temperatur

Bestimmung des Reaktionswärmewertes der Einfluß der Reaktionstemperatur nicht berücksichtigt wird.

Die gewohnheitsmäßig in Rechnung genommene Reaktionswärme von 427 kcal/kg CaCO_3 ist auf Zimmertemperatur bezogen. Der Wärmebedarf der in der Praxis sich bei etwa 900 °C abspielenden Reaktion ist nach der Formel von J. Johnston zu berechnen. $Q_R = 42700 + 2,182T - 0,005485 T^2$ kcal/g Mol. Bei $T = 900 + 273 = 1173$ °K ist die Reaktionswärme: $Q_R = 42700 + 2560 - 7560 = 37700$ kcal/kg Mol.

Das Molekulargewicht von CaCO_3 ist 100,12.

Der Wert der Reaktionswärme, berechnet auf 1 kg CaCO_3 bei einer Reaktionstemperatur von 900 °C beträgt:

$$q_R = 37.700/100,12 = 377 \text{ kcal/kg CaCO}_3.$$

In der Praxis darf bei Betrachtung des Brennvorganges die Tatsache nicht unberücksichtigt bleiben, daß der dem Brennen unterworfenen Kalkstein nicht unendlich klein ist, sondern eine endliche Masse besitzt. Demzufolge ist bei Beginn des Brennens die Temperatur der Kalksteinmitte bei 900 °C Oberflächentemperatur wesentlich niedriger als die Reaktionstemperatur und es muß der Kern während des Brennens auf die Reaktionstemperatur gebracht werden. Dabei ist aber eine Überhitzung der sich in der Grenzschicht bei 900 °C bildenden Reaktionsprodukte CaO und CO_2 unvermeidbar. Die Durchführung der Wärmemenge durch die dauernd stärker werdende CaO -Hülle, die zur Erwärmung des Kernes und zur Dissoziation des CaCO_3 nötig ist, wird durch das Temperaturgefälle zwischen Oberfläche und Grenzschicht möglich. Daher muß die Steinoberfläche auf über 900 °C erhitzt werden. Das von der Grenzschicht auf die Oberfläche diffundierende CO_2 übernimmt laut A. Nahotzky während des Diffusionsvorganges infolge der sehr feinen molekularen Verteilung den überhitzten Temperaturwert der CaO -Hülle. So entspricht die Temperatur des aus der Kalksteinoberfläche austretenden CO_2 nahezu der der Kalksteinoberfläche.

Wie die zuvor erwähnten wärmetechnischen Berechnungen voraussetzen, daß zwischen Wärmeleitung und Reaktionsgeschwindigkeit ein Gleichgewichtszustand herrscht, muß dies auch bei den folgenden Berechnungen als Ausgangspunkt betrachtet werden.

Auf Grund obiger Darlegungen kann nun die sich aus der Wärmebilanz ergebende Differentialgleichung aufgestellt werden. Die dem Stein in der Zeit dt bei kugelförmigem Kalkstein mit Radius R abgegebene Wärmemenge ist:

$$dQ = \alpha(\vartheta_f - \vartheta_0) \cdot 4 \pi \cdot R^2 \cdot dt \dots \text{kcal}$$

Nach dem obigen verteilt sich die von den Rauchgasen aufgenommene Wärmemenge wie folgt:

$$dQ = \gamma_1 \cdot c_1 \cdot 4 \cdot \pi \int_r^R \varrho^2 \cdot d\varrho \cdot d\vartheta_1 + \gamma_2 \cdot c_2 \cdot 4 \pi \cdot r^2 \cdot d\varrho \cdot 377 + 0,224 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot d\varrho \cdot \gamma_2 \cdot c_p (\vartheta_0 - 900) + \gamma_2 \cdot c_2 \cdot 4 \cdot \pi \int_0^r \varrho^2 \cdot d\varrho \cdot d\vartheta_2 \dots \text{kcal}$$

wobei

$$d\vartheta_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \cdot \gamma_1} \cdot \left[\frac{d^2 \vartheta}{d\varrho^2} + \frac{2}{\varrho} \frac{d\vartheta}{d\varrho} \right] \cdot dt \text{ und}$$

$$d\vartheta_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \cdot \gamma_2} \cdot \left[\frac{d^2 \vartheta}{d\varrho^2} + \frac{2}{\varrho} \frac{d\vartheta}{d\varrho} \right] \cdot dt$$

aus der Grundgleichung der Wärmeleitung entnommen ist und r der Radius des CaCO_3 -Kernes ist.

Hierbei kennzeichnet das erste Glied den Wärmebedarf, der zur Temperaturerhöhung der CaO -Hülle notwendig ist; das zweite Glied den Wärmebedarf, der von der sich in der Grenzschicht abspielenden Reaktion benötigt wird; das dritte Glied den Wärmebedarf, mit dem die in der Grenzschicht bei 900 °C entstehende CO_2 -Temperatur erhöht wird; das vierte Glied den Wärmebedarf, der die Hebung der CaCO_3 -Kerntemperatur fördert.

Die Lösung der auf diese Weise gewonnenen Differentialgleichung zweiten Grades mit drei Veränderlichen stößt auf einige Schwierigkeiten. Die Lösung kann aber bedeutend vereinfacht werden, wenn man das Verhältnis der einzelnen Wärmemengen zur nötigen Gesamtwärmemenge untersucht und gewisse Vereinfachungen einführt, wie dies im folgenden gezeigt wird.

Der maximale Oberflächentemperaturwert der CaO -Hülle darf wegen Todbrandgefahr nicht über 1150 °C steigen. Der Stein erreicht diese Temperatur erst gegen Ende des Brennvorganges und die Temperatur der Steinmitte beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa 900 °C. Im Falle einer linearen Wärmeverteilung, deren Berechtigung nachstehend bewiesen werden soll, kann der Endtemperaturwert der CaO -Hülle folgend bestimmt werden:

Der Wärmehalt des gebrannten Kalkes bei kugelförmigem Stein mit Radius R ist

$$Q = c \cdot \gamma \cdot \int_0^R \vartheta \cdot 4 \pi \varrho^2 d\varrho$$

wobei $\vartheta = f(\varrho)$ sich nach nebenstehender Abbildung ändert:

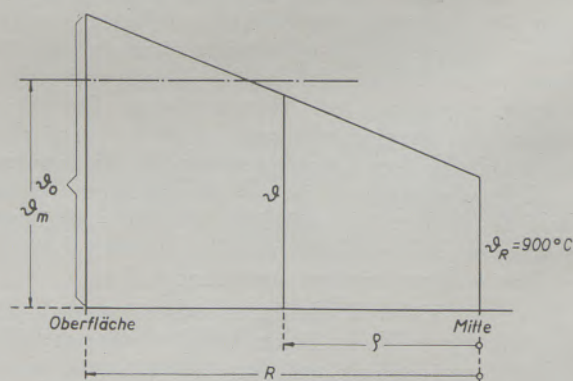


Abb. 2

Änderung von ϑ mit dem Radius R

$$\vartheta = 900 + \frac{Q}{R} (\vartheta_0 - 900) \dots \dots \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Die Durchschnittstemperatur beträgt:

$$\vartheta_m = \frac{Q}{c \gamma \frac{4}{3} R^3 \pi} = \frac{c \gamma 4 \pi \int_0^R \vartheta q^2 dq}{c \cdot \gamma 4 \pi \frac{R^3}{3}} = \frac{3}{R^3} \int_0^R \vartheta q^2 dq$$

$$\vartheta_m = \frac{3}{R^3} \left[900 \int_0^R q^2 dq + \frac{\vartheta_0 - 900}{R} \int_0^R q \cdot q^2 dq \right] = \frac{3}{R^3} \left[900 \frac{R^3}{3} + \frac{\vartheta_0 - 900}{R} \cdot \frac{R^4}{4} \right]$$

$$\vartheta_m = 900 + \frac{3}{4} (\vartheta_0 - 900) = \frac{3}{4} \vartheta_0 + \frac{1}{4} \cdot 900 \dots \dots \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bei $\vartheta_{0 \text{ max.}} = 1150 \text{ } ^\circ\text{C}$ ist $\vartheta_m = \frac{3}{4} \cdot 1150 + \frac{1}{4} \cdot 900 = 1088 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Der maximale Wärmebedarf für die Überhitzung der CaO-Hülle, bezogen auf 1 kg CaCO₃, beträgt $i_1 = 0,56 (1088 \cdot 0,244 - 900 \cdot 0,221) = 25 \text{ kcal}$, wobei 0,56 das Gewicht des aus 1 kg CaCO₃ entstehenden CaO ist.

Der Wärmebedarf der Reaktion bei 900 °C nach Johnston ist $i_2 = 377 \text{ kcal}$.

Der Wärmebedarf, der zur Überhitzung des CO₂ nötig ist, wächst stetig während des Brennens, da das Maß der Überhitzung der Oberflächentemperatur des Steines proportional ist. Im Laufe des Brennens steigt die Oberflächentemperatur des Steines von 900 °C auf 1150 °C an. Im Fall einer arithmetischen Proportion können wir im Durchschnitt mit

$$\vartheta = \frac{1150 + 900}{2} = 1025 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Überhitzungstemperatur rechnen.

Somit ist

$$i_3 = 0,224 (1025 \cdot 0,530 - 900 \cdot 0,520) = 17 \text{ kcal.}$$

Unter der Annahme, daß zu Beginn der Brennzone die Durchschnittstemperatur des Kalksteines 850 °C beträgt, werden zur Temperaturerhöhung des CaCO₃-Kernes $i_4 = 900 \cdot 0,280 - 850 \cdot 0,275 = 18 \text{ kcal}$ benötigt.

Hieraus folgt, daß 1 kg CaCO₃ in der Brennzone

$$i = 25 + 377 + 17 + 18 = 437 \text{ kcal}$$

aus den Rauchgasen aufnehmen muß.

Hieraus ist weiterhin zu ersehen, daß die Wärmenahme in der Grenzschicht am stärksten ist, also

dort, wo sich die Dissoziation des CaCO₃ abspielt. Aus dem gesamten Wärmebedarf müssen

$$n = \frac{377 + 18}{437} \cdot 100 = 90,5 \%$$

infolge der CaCO₃-Zersetzung und der Erhitzung des Kernes durch die CaO-Hülle geführt werden.

Wenn jetzt die durchschnittlich 9,5 %ige Wärmemenge vernachlässigt und in der Berechnung vorausgesetzt wird, daß die gesamte, an den Stein von den Rauchgasen abgegebene Wärmemenge durch die CaO-Schicht geführt werden muß, erhält man die einfache Gleichung der Wärmeleitung. Dann sieht die Differentialgleichung der Wärmebilanz folgendermaßen aus:

$$\alpha(\vartheta_f - \vartheta_0) \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot dt = \lambda \cdot 4 \cdot \pi \cdot q^2 \cdot \frac{d\vartheta}{dq} \cdot dt \dots \text{ kcal}$$

Darin ist R der Radius des Kalksteines,

ϑ_f die Rauchgastemperatur,

ϑ_0 Oberflächentemperatur des Kalksteines,

λ die Wärmeleitzahl des gebrannten Kalkes.

Diese Werte sind während der Zeit dt als konstant zu betrachten. Die Variable ändert sich während der Wärmeleitung von R bis zum Radius des CaCO₃-Kernes r; inzwischen fällt die Temperatur vom Oberflächenwert ϑ_0 auf 900 °C.

Wenn man sich nun vor Augen hält, daß die ungefähr 10 %ige Wärmemenge, die für die Überhitzung der gebrannten Schichte und des CO₂ im Laufe der Wärmeleitung von der CaO-Hülle verbraucht wird, und daß die Dicke der gebrannten Schichte infolge Schrumpfung, wobei diese nicht einem Todbrand zugeschrieben werden darf, immer kleiner ist, als ursprünglich angenommen, ferner die Oberfläche des Kalksteines immer größer als die eines ungünstig angenommenen, kugelförmigen Steines ist, wird es leicht verständlich, daß die Berechnungen, die die dargelegten Gedanken berücksichtigen, keinen größeren Fehler beinhalten. Da nun zur Übertragung größerer Wärmemengen im Falle gleicher Wärmeleitzahl und gleicher CaO-Schichtdicke eine größere Temperaturdifferenz nötig ist, verschiebt sich diese Berechnung infolge der behandelten Vereinfachungen in Richtung Sicherheit.

Da die Reaktionstemperatur mit 900 °C gegeben ist, ergibt die Rechnung bei einer größeren Temperaturdifferenz auch eine größere Flächentemperatur als in Wirklichkeit. Hierdurch wird die Gefahr des Todbrandes verringert — wie dies später noch ausgeführt wird — und es ergibt sich für die Oberflächenwärmebelastung auf Grund der Formel

$$q = \alpha (\vartheta_f - \vartheta_0) \dots \dots \dots \text{ kcal}^2\text{/m}^2\text{/h}$$

ein niedrigerer Wert, als der effektive entspricht.

Durch die Vernachlässigung der zur Überhitzung der gebrannten CaO-Hülle und des CO₂ notwendigen Wärmemenge ergibt sich gegenüber den wahren Verhältnissen noch eine Abweichung. Daher muß im

Verlaufe der Wärmeverteilung in der CaO-Schicht ein Gleichgewichtszustand in der Weise vorausgesetzt werden, daß die an der Steinoberfläche eintretende Wärmemenge in ihrer ganzen Menge auch tatsächlich die Grezschicht erreicht.

Im Vergleich zu der Zeit, die zur Aufnahme der Gesamtwärmemenge nötig ist — da ja die gleiche Flächenwärmelastung herrscht — kann die CaO-Schicht die durchschnittlich etwa 10%ige Wärmemenge in ungefähr einem Zehntel der Gesamtzeit aufnehmen. So kann die Voraussetzung des Gleichgewichtszustandes bei den Berechnungen keinen größeren Fehler verursachen. Somit beweist der in Wirklichkeit nur angenäherte Gleichgewichtszustand die berechnete Voraussetzung einer linearen Wärmeverteilung. Nach Einführung der Vereinfachungen erhält man für die Wärmebilanz eine Differentialgleichung mit zwei Veränderlichen:

$$\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R^2 (\vartheta_t - \vartheta_o) \frac{d\vartheta}{\vartheta^2} = d\vartheta$$

Diese Differentialgleichung integriert, unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten Grenzen, ergibt:

$$\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R^2 \left(-\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right) (\vartheta_t - \vartheta_o) = \vartheta_o - 900$$

bzw. vereinfacht

$$\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{R}{r} - 1 \right) = \frac{\vartheta_o - 900}{\vartheta_t - \vartheta_o}$$

Die Temperatur der Oberfläche ist

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_t \cdot \frac{\alpha}{\lambda} R \left(\frac{R}{r} - 1 \right) + 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} R \left(\frac{R}{r} - 1 \right)} \dots \dots \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Die Wärmebelastung der Oberfläche ist

$$q = \alpha (\vartheta_t - \vartheta_o) = \alpha \cdot \frac{\vartheta_t - 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \cdot \left(\frac{R}{r} - 1 \right)} \dots \dots \dots \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

Vom Brennprozeß können wir dann ein anschaulicheres Bild erhalten, wenn wir die Berechnungen nicht als Funktion des CaCO₃-Kernradius, sondern als Funktion des Ausbrandmaßes durchführen.

Das Maß des Ausbrandes, das heißt das Verhältnis des gebrannten zum Gesamtrauminhalt wird durch die Gleichung

$$\varphi = \frac{R^3 - r^3}{R^3}$$

bei kugelförmigem Stein, ausgedrückt. Daraus ist

$$\frac{R}{r} = \frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}}$$

Dieser Wert in die gewonnene Gleichung eingesetzt, ergibt die Oberflächentemperatur als Funktion des Ausbrenngrades:

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_t \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}} - 1 \right) + 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}} - 1 \right)} \dots \dots \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Die Wärmebelastung der Oberfläche, ebenfalls als Funktion des Ausbrenngrades, ergibt

$$q = \alpha \cdot \frac{\vartheta_t - 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}} - 1 \right)} \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

Die Ofenleistung, die der Wärmebelastung der Oberfläche proportional ist, hängt bei gegebener Kalksteinkorngröße von der Temperatur und der Wärmedurchgangszahl der sich im Ofen befindenden Rauchgase ab.

Solange die „n“-%ige Hebung der Rauchgastemperatur nur einen

$$n \cdot \frac{\vartheta_t}{\vartheta_t - 900} > n\text{-}\% \text{igen}$$

Leistungszuwachs liefert, kommt die Wärmedurchgangszahl sowohl im Zähler als auch im Nenner vor. Daher kann eine intensivere Leistungssteigerung — im Gegensatz zu den aus nach Heiligenstaedt durchgeführten Berechnungen abzuleitenden Folgerungen — nicht durch Vergrößerung der Wärmedurchgangszahl, sondern durch Erhöhung der Rauchgastemperatur erzielt werden.

Beim Kalkbrennen ist jedoch die Erhöhung der Rauchgastemperatur infolge Todbrandgefahr begrenzt. Um einen Todbrand zu vermeiden, darf die maximale Oberflächentemperatur des Steines 1150 °C nicht übersteigen. Somit beträgt, unter Berücksichtigung des Vorangegangenen, die zulässige maximale Rauchgastemperatur, als Funktion des Ausbrandgrades:

$$\vartheta_t = \frac{\vartheta_o \left[1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}} - 1 \right) \right] - 900}{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}} - 1 \right)} \dots \dots \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bei $\vartheta_o = 1150 \text{ } ^\circ\text{C}$ wird

$$\vartheta_{t\text{max}} = 1150 + \frac{1150 - 900}{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}} - 1 \right)}$$

$$= 1150 + \frac{250}{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \varphi}} - 1 \right)} \dots \dots \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Betrachten wir die Oberflächenwärmebelastung als Funktion des Ausbrandgrades, so ist zu Beginn des Brennens, bei $\varphi = 0$ der Nenner gleich 1 und $q = \alpha (\vartheta_f - 900) \text{ kcal/m}^2\text{h}$. Dies entspricht auch den tatsächlichen Verhältnissen, da zu Beginn der Brennzone die Oberflächentemperatur des Steines 900°C beträgt. Im Moment des vollkommenen Ausbrennens, bei $\varphi = 1$, wird der Nenner unendlich und die Oberflächenwärmebelastung wird Null. Dies gilt jedoch nur hinsichtlich des Ausbrandes, da zu diesem Zeitpunkt der Reaktionsvorgang schon beendet ist. Die Oberflächentemperatur bei $\varphi = 1$ wird laut Berechnungsergebnis ebenfalls gleich der Rauchgastemperatur. Tatsächlich kann natürlich die Oberflächentemperatur den Temperaturwert der Rauchgase nicht, oder nur nach unendlich langer Zeit erreichen und demzufolge erreicht auch die Oberflächenwärmebelastung nicht den Nullwert. Diese Abweichung vom tatsächlichen Zustand liegt in der Vernachlässigung der Wärmekapazität der ausgebrannten CaO-Schichten. Vom Zeitpunkt des vollständigen Ausbrandes an werden wieder die üblichen Formeln des Erhitzungsvorganges verwendet. Die Tatsache, daß die Berechnungen einen größeren Oberflächentemperaturwert ergeben als es dem effektiven Wert entspricht, beweist also lediglich, daß die Berechnungen entsprechend den abgeleiteten Formeln sich in Richtung Sicherheit verschoben haben. Würden die Rauchgase den aus den Berechnungen sich ergebenden maximalen Temperaturwert erreichen, dann erreicht die Oberfläche kaum den Temperaturwert von 1150°C .

Die Brennverhältnisse im Ofen werden durch die gleichzeitig zu brennenden, verschiedenen Steinkörnungen noch komplizierter. Bei normalem Betriebsgang und gleichmäßiger Steinwanderung, Kanal- und Knollenbildungen und die daraus resultierende Unregelmäßigkeit des Feuers sei ausgeschlossen, ist in jedem Punkt des Ofens die Temperatur zeitlich praktisch konstant.

Diese Temperaturen müssen natürlich so gehalten sein, daß ein Todbrand vermieden wird. Aus diesem Grund muß der Wärmeverlauf im Ofen nach dem Wärmebedarf der kleinsten Steinkörnungen bemessen werden. Nachdem die kleinsten Steinstücke erbrannt sind, darf die Rauchgastemperatur 1150°C nicht übersteigen. Die Länge der Brennzone ist durch die Brennzeit der maximalen Steinkorngröße bedingt, die kleineren Steinkörnungen verweilen dadurch noch einige Stunden nach dem Ausbrand in der Verbrennungszone; somit erreichen die Steinoberflächen, entsprechend den üblichen Erhitzungsformeln, den auf 5 bis 10°C angenäherten Wert der Rauchgastemperaturen.

Die Berechnung der notwendigen Brennzeit erfolgt nach der Formel

$$t = \varphi \cdot \frac{g \cdot i}{q_{\text{Mittel}}} \dots \dots \dots h$$

Hierin ist g die Flächenbelastung; (nach Heiligenstaedt ist $g = 580 \text{ kg/m}^2$); i die während des

Brennens dem Stein abzugebende Wärmemenge (siehe oben; $i = 437 \text{ kcal/kg CaCO}_3$), q_{Mittel} der Durchschnittswert der Flächenwärmebelastung.

Hieraus ist ersichtlich, daß bei gegebenem t -Wert, der proportional der im Ofen gemessenen Entfernung ist, verschieden große Steine auch verschiedene Ausbrandgrade aufweisen. Die Gleichzeitigkeit der Rauchgastemperaturen können wir in den Berechnungen erster Annäherungen dermaßen sichern, daß wir das Maß des Ausbrandes mit den extremen Werten der Korngrößen in zwei verschiedenen Maßstäben als lineare Proportion darstellen, da sich g mit der Korngröße linear verändert. Da jedoch auch q_{Mittel} eine Funktion von φ darstellt, ist eine vollkommene Gleichzeitigkeit nicht mehr gegeben, doch kann man nach dem auf diese Art erstelltem ϑ - φ -Diagramm ein den tatsächlichen Verhältnissen nahekommendes Zeit-Temperatur-Diagramm erhalten.

Die hier abgeleitete Rechenmethode ermöglicht eine auf ausreichender Sicherheit beruhende größenmäßige Bestimmung der Verbrennungszone und ermöglicht eine gute Rauchgasverteilung, deren Bedeutung in der Verhütung des Todbrandes liegt.

2. Die Bestimmung des Wärmebedarfes

Die Frage des Wärmebedarfes hängt eng mit den Problemen der Feuerungstechnik zusammen. Die Gestaltung des Wärmebedarfes wird durch die Beschaffenheit des verwendeten Brennmaterials und den gewählten Luftüberschuß beeinflusst.

Die Bestimmung des spezifischen Brennstoffverbrauches erfolgt im allgemeinen nach Erfahrungsrichtwerten. (Siehe „Anhaltzahlen für Wärmewirtschaft“, S. 44, 1949.) Diese bewegen sich jedoch aus den angeführten Gründen in ziemlich großen Grenzen. Bei gegebenen Feuerungsbedingungen ist es unerlässlich, mittels einer prinzipiell richtigen, theoretischen Berechnung den notwendigen Brennstoffverbrauch einwandfrei zu ermitteln.

Die zumeist verwendete, gebräuchlichste Lösung scheint die Reichhardt'sche Diagramm-Konstruktion zu sein. Trotzdem findet man bei der praktischen Anwendung dieses Verfahrens prinzipielle Fehler. Einer der grundlegenden Fehler ist der, daß obwohl aus der Abbildung der Reaktionstemperaturwert mit 900°C klar hervorgeht, der Reaktionswärmewert von 20°C entnommen wird. Auch wird die räumliche Ausbreitung dieses Kalksteines nicht beachtet, obwohl zwischen Oberfläche und Mitte eine Temperaturdifferenz besteht. Demzufolge ist es notwendig, während des Brennens mit einem Vorwärmebedarf beim Kern und mit einem Überhitzungswärmebedarf bei der gebrannten Hülle zu rechnen. Einem derartigen Zuwachs des nötigen Wärmebedarfes verdankt man, daß — trotz des bei der Bestimmung der Reaktionswärme begangenen Fehlers — für die Praxis noch brauchbare, wenn auch nicht genaue Werte erhalten werden können. Die nachfolgenden Abbildungen geben eine Vergleichsmöglichkeit der theoretischen und praktischen Form des Reichhardt'schen Diagrammes.

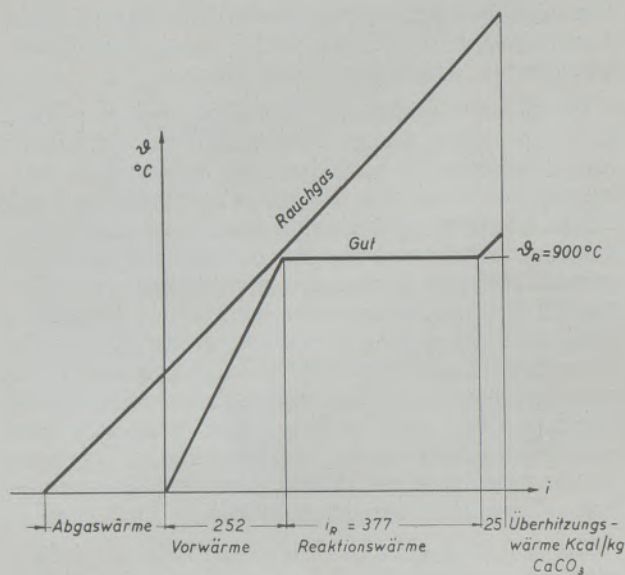


Abb. 3
Theoretisches Diagramm

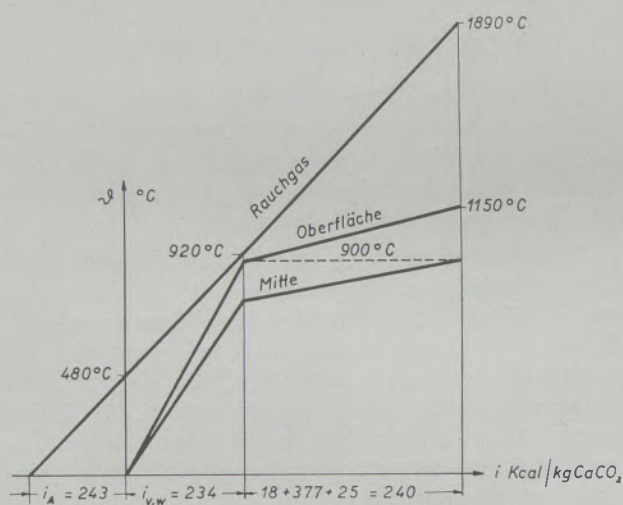


Abb. 4
Praktisches Diagramm

Obwohl das Reichardt'sche Diagramm von den ablaufenden Vorgängen ein anschauliches Bild gibt, ist die rechnerische Bestimmung des Brennstoffverbrauches der kürzere Weg, da die Konstruktionsversuche in Wegfall kommen. Die obigen Reichardt-Diagramme wurden nach der folgenden Wärmebilanz konstruiert.

Im Ofen spielt sich folgender Vorgang ab:

In der Vorwärmezone erwärmt sich der Kalkstein auf einen, der Reaktionstemperatur naheliegenden Temperaturwert. Währenddessen verliert der Stein seine Feuchtigkeit bzw. seinen eventuellen Kristallwassergehalt. Außerdem zerfallen sonstige Verunreinigungen des Kalksteines in der Vorwärmezone und dieser kommt mit 900°C Oberflächentemperatur und

einer Durchschnittstemperatur von etwa 850°C in die Brennzone. Um einen guten thermischen Wirkungsgrad und eine gleichmäßige Vorwärmung zu erreichen ist es nötig, daß der Temperaturwert der aus der Brennzone abziehenden Rauchgase etwas über 900°C liegt, zum Beispiel bei etwa 920°C. Die Wärmemenge, die während des Brennens über 900°C dem Stein zugeführt wurde — wie im vorigen Abschnitt ausgeführt — wird vom Wärmebedarf der Reaktion, für die Überhitzung der sich bei 900°C bildenden Reaktionsprodukte und für die Kernerhitzung benötigt und verbraucht. Das überhitzte CaO gibt seine Wärme in der Kühlzone der Verbrennungsluft ab und verläßt diese mit etwa 50°C Durchschnittstemperatur. Ebenso gibt das überhitzte CO₂ seine Wärme in der Brennzone an den Kalkstein ab und verläßt diese mit sonstigen Verbrennungsprodukten mit etwa 920°C. Geht man von der zusammengezogenen Wärmebilanz der Brenn- und Kühlzone aus, so ist es nicht nötig, mit der Überhitzung der Reaktionsprodukte zu rechnen. (Der aus der Überhitzung der Reaktionsprodukte entstehende Wärmeinhalt vergütet sich innerhalb der Rechnungseinheit.)

Auf der Basis der Bruttowärmebilanz des Ofens sind die Berechnungen deshalb nicht durchführbar, weil die Reaktion bei festgesetztem Temperaturwert (900°C) vor sich geht und dadurch der minimale Temperaturwert der aus der Brennzone abziehenden Rauchgase bestimmt ist. Als Ergänzung kann man nach Bestimmung des Brennstoffverbrauches schon leicht die Wärmebilanz für die Vorwärmezone aufstellen. Hieraus können dann auch die aus dem Ofen abziehenden Rauchgastemperaturen bestimmt werden. Sollte der Kalkstein noch andere Carbonat-Verunreinigungen, wie MgCO₃ und FeCO₃ enthalten, deren Zerfall ebenfalls in der Vorwärmezone vor sich geht, sind diese Einflüsse auf die Wärmebilanz nach vorhergehendem zu berücksichtigen.

Als Beispiel wird hier eine Berechnung mit Generatorgasfeuerung durchgeführt.

$H_u = 1500 \text{ kcal/Nm}^3$. Zur Erreichung einer guten und vollkommenen Verbrennung wird die Luftüberschußzahl mit $n = 1,2$ angenommen.

Die Wärmebilanz der Brenn- und Kühlzone, bezogen auf 1 kg CaCO₃ beträgt nun:

Wärmeeinnahme

1. Der Wärmeinhalt des aus der Vorwärmezone mit etwa 850°C kommenden Kalksteines beträgt:
 $i_1 = 850 \cdot 0,275 = 234 \text{ kcal}$
2. Der Wärmeinhalt des bei 900°C entstehendem CaO beträgt:
 $i_2 = \frac{56,07}{100,12} \cdot 900 \cdot 0,22 = 111 \text{ kcal}$
3. Der Wärmeinhalt des bei 900°C entstehenden CO₂-Reaktionsproduktes beträgt:
 $i_3 = 0,224 \cdot 900 \cdot 0,520 = 105 \text{ kcal}$

4. Die mit $X \text{ Nm}^3$ Generatorgas von 15°C eingetragene physikalisch-chemische Wärmemenge beträgt:
 $i_4 = (15 \cdot 0,314 + 1500) \cdot X = 1505 \cdot X \text{ kcal}$
5. Die mit $1,55 \cdot X \text{ Nm}^3$ Luft von 15°C eingetragene physikalische Wärmemenge beträgt:
 $i_5 = 15 \cdot 0,311 \cdot 1,55 X = 7 X \text{ kcal}$
- Die gesamte Wärmeeinnahme beträgt demnach:
 $1512 X + 450 \text{ kcal.}$

Wärmeausgabe

1. Zur Erwärmung des Kalksteines auf Reaktionstemperatur werden benötigt:
 $i_1 = 900 \cdot 0,28 = 252 \text{ kcal}$
2. Der Reaktionswärmebedarf bei 900°C nach Johnston beträgt:
 $i_2 = 377 \text{ kcal}$
3. Der Wärmeinhalt des bei 50°C Durchschnittstemperatur ausscheidenden Kalkes beträgt:
 $i_3 = \frac{56,07}{100,12} \cdot 50 \cdot 0,187 = 5 \text{ kcal}$
4. Erfahrungswert für Wandverluste:
 $i_4 = 30 \text{ kcal}$
5. Die mit den Verbrennungsprodukten von 920°C und dem aus der Reaktion entstehendem CO_2 abgehende Wärme beträgt:
 $i_5 = 920 (2,36 \cdot 0,370 X + 0,224 \cdot 0,523) = 803 \cdot X + 108 \text{ kcal}$
6. Die durch unvollkommene Verbrennung an die abziehenden Rauchgase gebundene Wärmemenge (Erfahrungswert: 0,5 % CO) beträgt:
 $i_6 = 0,005 \cdot 3050 \cdot (2,36 X + 0,224) = 36 X + 3 \text{ kcal}$

Die gesamte Wärmeausgabe beträgt demnach:
 $839 X + 775 \text{ kcal}$

Der Gasbedarf aus der Wärmebilanz ist

$$X = \frac{775 - 450}{1512 - 839} = \frac{325}{673} = 0,485 \text{ Nm}^3 \text{ Gas/kg CaCO}_3$$

$$\text{Für } 1 \text{ kg CaO werden } v = \frac{0,845 \cdot 100,12}{56,07} =$$

$0,867 \text{ Nm}^3$ Generatorgas benötigt. Der spezifische Wärmeverbrauch $q = 0,867 \cdot 1500 = 1300 \text{ kcal/kg CaO.}$

Der auf 1 kg gebrannten Kalk bezogene wahre Wärmeverbrauchswert wird etwas niedriger sein als der errechnete, da der praktische CaO-Gehalt des Kalksteines — infolge Verunreinigungen und wegen des in kleineren oder auch größeren Mengen zurückbleibenden CO_2 —, 100 % nicht erreicht. Bei ge-

gebener Kalksteinzusammensetzung kann dies uns schwer berücksichtigt werden.

Der Vollständigkeit halber kann auch noch die Bestimmung der Temperatur der den Ofen verlassenden Abgase aus der Wärmebilanz der Wärmezone erfolgen.

Die Wärmebilanz der Brennzone, bezogen auf 1 kg CaCO_3 :

Wärmeeinnahme

1. Der Wärmeinhalt des Kalksteines bei etwa 15°C beträgt:
 $i_1 = 15 \cdot 0,192 = 3 \text{ kcal}$
2. Der Wärmeinhalt des Rauchgases bei 920°C beträgt:
 $i_2 = 803 \cdot 0,485 + 108 = 497 \text{ kcal}$
- Die Wärmeeinnahme beträgt demnach insgesamt:
 500 kcal.

Wärmeausgabe

1. Zur Erwärmung des Kalksteines auf 850°C werden benötigt:
 $i_1 = 850 \cdot 0,275 = 234 \text{ kcal}$
2. Zur Verdampfung der 20/igen Feuchtigkeit werden benötigt:
 $i_2 = 0,02 \cdot 640 = 13 \text{ kcal}$
3. Als Erfahrungswert für auftretende Wandverluste:
 $i_3 = 10 \text{ kcal}$
4. Die mit den Rauchgasen abziehende Wärmemenge beträgt:
 $i_4 = Q \text{ kcal}$
- Die Wärmeausgaben betragen demnach insgesamt:
 $Q + 257 \text{ kcal.}$

Der Wärmeinhalt der abziehenden Rauchgase beträgt $Q = 500 - 257 = 243 \text{ kcal}$ und deren Temperatur

$$\vartheta = \frac{Q}{v \cdot c_p} = \frac{243}{2,36 \cdot 0,485 \cdot c_{pRg} + 0,224 \cdot c_{pCO_2}} = 480^\circ\text{C}$$

$$c_{pRg} = 0,352 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ Rauchgas} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$c_{pCO_2} = 0,476 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ CO}_2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Der wahre Temperaturwert der abziehenden Rauchgase wird etwas niedriger sein, da nach dem vorhergehendem der spezifische Brennstoffverbrauch auch niedriger ist als der errechnete. Die eventuellen Carbonatverunreinigungen des Kalksteines, die in der Vorwärmezone zerfallen, wirken auf die Rauchgase ebenfalls temperaturmindernd und rauminhaltvergrößernd. In der Praxis muß auch noch mit Falschlufteinströmung gerechnet werden.

Zur Erreichung einer besseren Anschaulichkeit wurden obige Wärmebilanzen graphisch mittels eines Shankey-Diagrammes dargestellt.

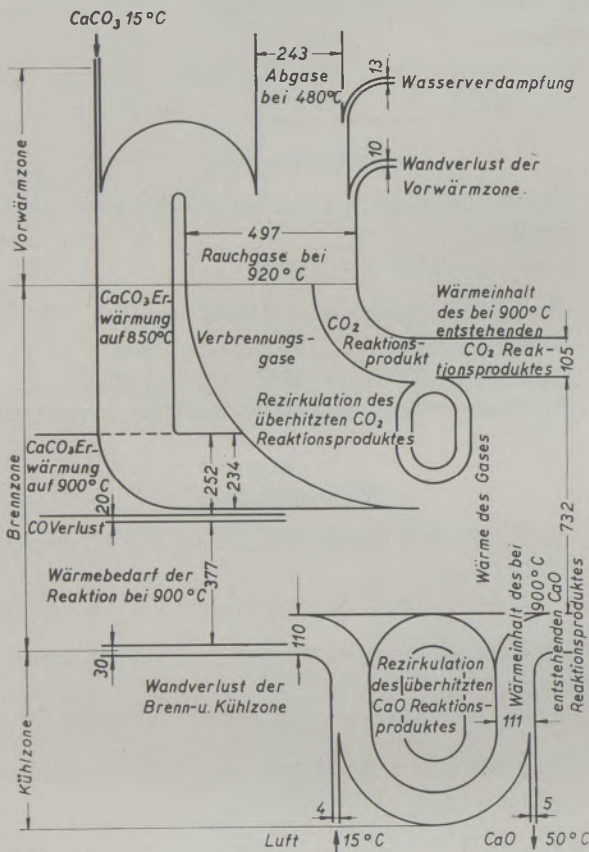


Abb. 5

Wärmestrombild für einen generatorgasbeheizten Kalkschachtöfen (Shankey-Diagramm)

Zur Konstruktion des Reichardt-Diagrammes muß nun noch die theoretische Verbrennungstemperatur bestimmt werden.

Nach dem Vorangegangenen ist der Wärmehalt der Verbrennungsluft, bezogen auf das Ende der Brennzone mit 1100 °C durchschnittlicher Kalktemperatur, 50 °C abgehenden Kalk und 5 kcal Wandverlust:

$$i_L = 0,56 \cdot (1100 \cdot 0,2245 - 50 \cdot 0,187) - 5 = 128 \text{ kcal/kg CaCO}_3$$

Die theoretische Verbrennungstemperatur beträgt:

$$\vartheta_{th} = \frac{0,485 \cdot 1512 + 128}{0,485 \cdot 2,36 \cdot c_p} = \frac{764}{0,403} = 1890 \text{ }^\circ\text{C}$$

Von dem zur Bestimmung der wahren Verbrennungstemperatur notwendigen pyrometrischen Wirkungsgrad stehen leider keine zuverlässigen Daten zur Verfügung. Die Erfahrung lehrt, daß zur Vermeidung eines Todbrandes entweder die Anwendung einer Rezirkulation oder bei Öfen mit einer Gegenstrombrennzone die Verwendung einer geteilten Gaszufuhr zweckmäßig ist.

Zusammenfassung

Die in der Fachliteratur aufgezeigten Rechenmethoden dürfen nur mit entsprechender Korrektur verwendet werden. Es ergeben sich somit für das Kalkbrennverfahren folgende wärmetechnische Formeln:

1. Bei Berechnung des Brennvorganges ist die Oberflächentemperatur ϑ_0 als Funktion des Ausbrenngrades φ :

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_f \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right) + 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \dots \text{ }^\circ\text{C}$$

Die Oberflächenwärmebelastung q als Funktion des Ausbrenngrades:

$$q = \alpha \cdot \frac{\vartheta_f - 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

Daraus ist die zur Vermeidung eines Todbrandes gebundene maximale Rauchgastemperatur:

$$\vartheta_{fmax} = 1150 + \frac{250}{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \dots \text{ }^\circ\text{C}$$

Die obigen Formeln bieten eine ausreichende Sicherheit.

2. Bei der Bestimmung des nötigen Wärmebedarfes muß der Einfluß der Reaktionstemperatur auf den Wert der Reaktionswärme Berücksichtigung finden. Außerdem muß auch die theoretische und wahre Gestaltung des Reichardt-Diagrammes beachtet werden.

Die hier aufgezeigten Darlegungen befassen sich nur mit dem Brennen von Kalk. Die Rechenmethoden sind jedoch nach geeigneter Umwandlung auch auf andere endotherme Vorgänge, insbesondere auf die Untersuchung von Carbonatzerlegungen (MgCO₃, FeCO₃, MnCO₃, Dolomit) anwendbar.

Die behandelten wärmetechnischen Gedanken benötigen in physikalisch-chemischer, hütten- und betriebstechnischer Hinsicht unbedingt eine Korrektur. Um dies im Interesse eines technischen Fortschrittes zu erreichen, ist eine weitsichtige Diskussion und Stellungnahme der betreffenden Fachleute unbedingt erforderlich.

Summary

The methods of calculation cited in bibliography may be used only with the respective corrections. Consequently the following formulae for the thermal efficiency of lime burning methods are found:

1. When calculating the process of burning, temperature of surface ϑ_0 as a mathematical function;

proportion between the initial charge of furnace and final product φ :

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_f \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right) + 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Capacity of heat transfer of the surface q as a function of the proportion between the initial charge of furnace and final product:

$$q = \alpha \cdot \frac{\vartheta_f - 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

It results from these formulae, that a maximum temperature of furnace gas must not be exceeded, so that final product is not spoiled by overheating, namely:

$$\vartheta_{f\max} = 1150 + \frac{250}{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

When using the above formulae, adequate safety is provided.

2) When determining the necessary amount of heat, the influence of the temperature of reaction upon the amount of heat of reaction must be taken into account. Moreover the theoretical and the actual shape of the Reichardt diagram must be watched.

The statements made above only refer to the burning of lime. However the methods of calculation also are applicable to other endothermic processes after a suitable modification; this refers in particular to the investigation of the decomposition of carbonates (MgCO_3 , FeCO_3 , MnCO_3 , dolomite).

The ideas regarding theory of heat, presented here absolutely necessitate a correction from the point of view of a physicist/chemist and a metallurgist. In the interest of technical progress it would be highly desirable, to secure an extensive cooperation and the criticism of the respective specialists.

Résumé

Les méthodes de calcul citées dans la bibliographie ne pourront être utilisées qu'avec les corrections correspondantes. Pour le rendement thermique des méthodes de la calcination de chaux il en résulte par conséquent les formules suivantes:

1) En calculant le processus de calcination la température des surfaces ϑ_0 présente la fonction du rapport entre la charge initiale du four et le produit final φ :

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_f \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right) + 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

La capacité de la transmission de chaleur des surfaces q comme fonction du rapport entre la charge initiale du four et le produit final

$$q = \alpha \cdot \frac{\vartheta_f - 900}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

Il résulte de ces formules qu'une température maximum de gaz de fumée ne sera pas surpassée afin d'éviter une calcination à mort du produit final.

$$\vartheta_{f\max} = 1150 + \frac{250}{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot R \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-\varphi}} - 1 \right)} \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ces formules garantissent une sécurité suffisante.

2) En déterminant la chaleur nécessaire l'influence de la température de réaction sur la chaleur de réaction doit être prise en considération. En outre, la forme théorique et actuelle du diagramme de Reichardt doit être examiné.

Les indications données ne s'appliquent que pour la calcination de la chaux. Toutefois, après une modification convenable ces méthodes de calcul s'appliquent également à d'autres processus endothermiques particulièrement en ce qui concerne l'examen de la décomposition des carbonates (p.e. MgCO_3 , FeCO_3 , MnCO_3 , et de la dolomie).

Ces considérations concernant la théorie de chaleur que nous venons de présenter doivent être corrigées du point de vue chimico-physique et métallurgie. Afin d'y atteindre un progrès technique la collaboration avec des experts est indispensable.

Literaturverzeichnis

Anhaltzahlen für Wärmewirtschaft.

Block: Das Kalkbrennen.

Heiligenstaedt: Wärmetechnische Rechnungen 1951.

Betreffende Mitteilungen der Radex-Rundschau (1950—1955).
Zement-Kalk-Gips (1950—1955).