

## PIONEER PAPERS IN CONVECTIVE MASS TRANSFER

2. WILHELM NUSSOLT: Die Verbrennung und die Vergasung der Kohle auf dem Rost, *Z. Ver. Dtsch. Ing.* **60**, 102 (1916). Reprinted by permission of VDI-VERLAG GmbH.

### Editor's Foreword

Although the connexion between mass transfer (diffusion) and heat transfer was mentioned by Reynolds in his paper "On the extent and action of the heating surface of steam boilers", forty years passed before the connexion was exploited. In the paper here reprinted, Nusselt introduced two important ideas: the first is that the burning of a carbon surface in a gas stream is controlled by the rate of mass transfer of oxygen to the surface; the second is that this transfer rate can be calculated from the formula which correlates heat transfer data in geometrically similar passages.

The first idea proved to be a highly fruitful contribution to the theory of the combustion of solid fuels. It is however the second which justifies the inclusion of the paper in the present series; for the calculations contained in the paper appear to be the first quantitative exploitation of the analogy between heat and mass transfer. The passages in the text in which the two ideas are explicitly stated are distinguished, for the convenience of readers, by italic printing.

D.B.S.

## DIE VERBRENNUNG UND DIE VERGASUNG DER KOHLE AUF DEM ROST\*

WILHELM NUSSOLT

IM GEGENSATZ zu der hohen technischen Vollkommenheit, welche die Verbrennung und die Vergasung der Kohle in den letzten Jahrzehnten erfahren haben, ist die Theorie dieser Vorgänge in dieser Zeit wenig gefördert worden. Bei der Schwierigkeit der experimentellen Forschung ist auch die vorhandene Zahl guter Versuche sehr gering. Als notwendige Vorarbeit für weitere planmäßige Versuche scheint es mir zunächst erwünscht, eine klare Vorstellung von den im Kohlenbett sich abspielenden physikalischen und chemischen Vorgängen zu besitzen. Diesem Zweck soll die folgende Abhandlung dienen.

Ein ebener Rost möge dauernd und gleichmäßig bis zu einer bestimmten Höhe  $H$ , Abb 1, etwa durch eine selbsttätige Wurfheizung beschickt werden. Die Zusammensetzung der Gase in verschiedenen Abständen von den

Roststäben, die dort herrschenden Temperaturen und die in der Zeiteinheit verbrennenden Kohlenmengen sollen bestimmt, und es soll weiter angegeben werden, wie sich diese Größen mit der Menge der zugeführten Frischluft ändern. Diese Luftmenge soll gleichmäßig verteilt unter den Rost eintreten. Dann werden obige Größen nur vom Abstand  $x$  über dem Rost abhängen. Die Frischluft habe die normale Zusammensetzung 0,21 Raumteile Sauerstoff und 0,79 Raumteile Stickstoff. Über dem Rost setzt sofort die Verbrennung nach der statischen Verbrennungsgleichung



ein; d. h. ein Mol<sup>†</sup> Kohlenstoff und ein Mol Sauerstoff liefern ein Mol Kohlensäure und  $h_1$  WE. Dieser Heizwert  $h_1$  ist nach der Kirchhoffschen Formel von der Temperatur abhängig, bei der die Verbrennung stattfindet. Bei 15° ist  $h_1 = 97\,650$  WE.

\* Sonderabdrücke dieses Aufsatzes (Fachgebiet: Dampfkessel) werden an Mitglieder des Vereines sowie Studierende und Schüler technischer Lehranstalten gegen Voreinsendung von 35 Pf. postfrei abgegeben. Andre Bezieher zahlen den doppelten Preis. Zuschlag für Auslandporto 5 Pf. Lieferung etwa 2 Wochen nach dem Erscheinen der Nummer.

† Ein Mol ist die Menge eines Stoffes in kg, die seinem Molekulargewicht gleich ist. Ist also  $\mu$  das Molekulargewicht, so sind  $\mu$  kg 1 Mol eines Stoffes. Es sind also 2 kg Wasserstoff 1 Mol Wasserstoff, 32 kg Sauerstoff 1 Mol Sauerstoff usw.

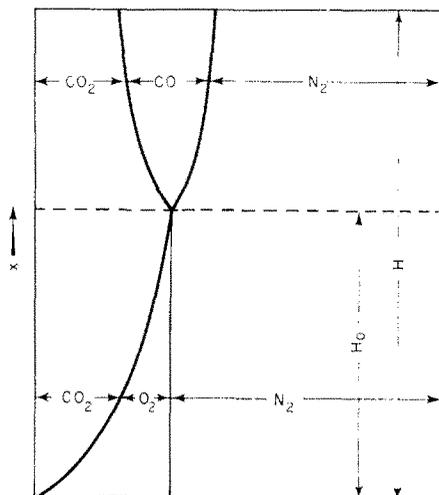
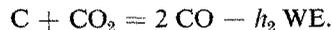


ABB. 1. Änderung der Gaszusammensetzung mit dem Abstand vom Rost.

Aus jener Formel folgt weiter, daß aus einem Raumteil Sauerstoff der gleiche Raumteil Kohlensäure entsteht. Es findet also durch die Verbrennung keine Kontraktion statt. Verfolgt man zunächst die mittlere Gaszusammensetzung über dem Rost, so erkennt man, daß das Gas aus Kohlensäure, Sauerstoff und Stickstoff bestehen wird. Solange noch Sauerstoff vorhanden ist, kann sich kein Kohlenoxyd bilden, aus Gründen, die nachher erörtert werden. Mit zunehmender Höhe nimmt der Sauerstoffgehalt ab, und in einer bestimmten Höhe  $H_0$  über dem Rost ist aller Sauerstoff verbrannt. Daß man am Dampfkessel bei geringem Luftüberschuß neben Sauerstoff Kohlenoxyd in den Abgasen feststellen kann, liegt daran, daß infolge ungleicher Beschickung die Schütthöhe  $H$  an manchen Stellen größer und an andern kleiner als die Höhe  $H_0$  ist, in der eben aller Sauerstoff verbraucht ist. An ersteren Stellen besteht das die Kohlschicht verlassende Gas aus  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$ , an letzteren aus  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{N}_2$ . Durch Mischung in den Zügen, in denen infolge der durch die Wärmeabgabe an die Heizfläche veranlaßten Temperatursenkung keine Verbrennung mehr stattfindet, entsteht das beobachtete Gemisch von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{N}_2$ .

Nimmt man der Einfachheit halber an, daß reiner Kohlenstoff verbrannt wird, so besteht

in dieser Zone das Gas aus 0,21 vH Raumteilen Kohlensäure und 0,79 vH Raumteilen Stickstoff. In Höhen größer als  $H_0$  verbrennt die Kohle zu Kohlenoxyd unter Zerlegung der vorher gebildeten Kohlensäure nach der Reaktionsgleichung



Es ist bemerkenswert, daß jetzt die Verbrennung nicht mehr unter Wärmeentwicklung, sondern mit Wärmeverbrauch stattfindet. Bei  $15^\circ$  ist

$$h_2 = 38 \ 250 \text{ WE.}$$

Da aus einem Mol Kohlensäure zwei Mole Kohlenoxyd entstehen, wird das Volumen der Verbrennungsgase an das halbe Volumen des gebildeten Kohlenoxydes vergrößert. Sie bestehen jetzt aus Kohlensäure, Kohlenoxyd und Stickstoff. Die Raumteile von Kohlensäure und Stickstoff nehmen mit zunehmendem  $x$  ab und der Raumteil vom Kohlenoxyd nimmt zu. Damit ist qualitativ die Art und Veränderlichkeit der Gaszusammensetzung in der Kohle gegeben. Es ist dabei zu beachten, daß es sich hier immer um die Änderung der mittleren Gaszusammensetzung in einer Ebene parallel zum Rost handelt. Die Verbrennung soll nun genauer verfolgt werden, insbesondere soll jetzt die Veränderung der Gaszusammensetzung in den Räumen zwischen den Kohlenstücken untersucht werden.

Zur Vereinfachung der Betrachtung werde angenommen, daß die verbrennende Kohle nicht aus einzelnen Körnern, sondern aus ebenen Platten gebildet sei, die parallel zu einander und senkrecht auf den Rost gestellt seien, Abb. 2. Es soll jetzt die Veränderung der Gaszusammensetzung im Luftspalt längs der Strecke AB im Abstand  $x$  vom Rost an gegeben werden. Infolge der hohen Affinität des Sauerstoffes zur Kohle wird bei A und bei B, also an der Oberfläche der Kohle, wenn eine gewisse Mindesttemperatur überschritten ist, aller dort vorhandene Sauerstoff verbrannt sein, so daß dort die Sauerstoffkonzentration null und die Kohlensäurekonzentration demnach 0,21 ist. Die weitere Verbrennung an den Stellen A und B hängt dann von der Menge Sauerstoff ab, die an die Oberfläche der Kohle gelangt. Sobald ein

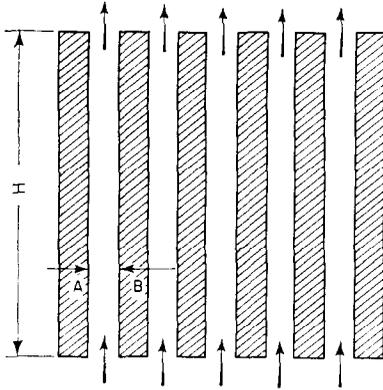


ABB. 2. Ideeelles Kohlenbett.

Sauerstoffmolekül auf die Kohlenwand trifft, wird es sofort zu Kohlensäure verbrannt; deshalb ist die Sauerstoffkonzentration bei A und B dauernd null. Das Vordringen von Sauerstoff aus dem sauerstoffreichen Kern des Gasstromes nach der Wand erfolgt nun nach den Gesetzen der Diffusion. Es diffundiert Sauerstoff aus dem Innern des Gases nach der Wand und Kohlensäure von der Wand nach dem Innern. Die Gaszusammensetzung wird in ihrer Veränderlichkeit längs AB durch Abb. 3 veranschaulicht. Die Menge der an der Kohlenfläche also bei A und B in der Zeiteinheit verbrannten Kohle ist demnach lediglich abhängig von der Diffusionsgeschwindigkeit, also von einer rein

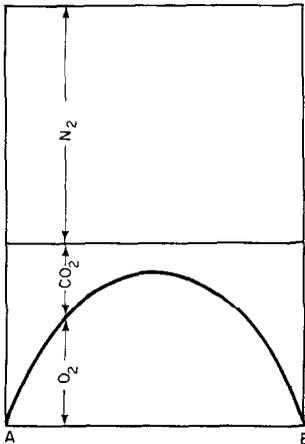


ABB. 3. Änderung der Gaszusammensetzung in einem Horizontalquerschnitt der Verbrennungszone.

physikalischen Größe. Die nach der Wand diffundierte Sauerstoffmenge kann nach den Grundgesetzen der Diffusion berechnet werden. Da mit 32 kg Sauerstoff 12 kg Kohlenstoff verbrennen, ist auch die an der Wand verbrannte Kohlenmenge bekannt. Nach dem Grundgesetz der Diffusion der Gase ist die in der Zeiteinheit durch ein Flächenelement  $df$  hindurchströmende Sauerstoffmenge proportional dem Abfall der Dichte des Sauerstoffes auf die Längeneinheit senkrecht zu jenem Flächenelement und proportional der Diffusionszahl  $k$ .

- Ist
- $df$  ein Flächenelement,
- $dz$  ein Zeitelement,
- $dG$  das in dieser Zeit durch jene Fläche diffundierende Sauerstoffgewicht,
- $\gamma$  die Dichte des Sauerstoffes in kg/cbm und
- $s$  die Koordinate auf der Flächennormaler, besteht die Gleichung

$$dG = k df dz \frac{d\gamma}{ds}$$

Die Dimension von  $k$  ist  $m^2st^{-1}$ .

Die Diffusionszahl  $k$  ist nur dann unabhängig vom Mischungsverhältnis, wenn zwei Gase ineinander diffundieren. Sind mehrere Gase vorhanden, so ist ein Einfluß des Mischungsverhältnisses vorhanden, der merklich ist, wenn die Dichten der diffundierenden Gase stark verschieden sind, wenn man also z. B. Wasserstoff in Luft diffundieren läßt. Bei der Verbrennung hält sich der Dichteunterschied der Gase in Grenzen, die die Diffusionszahl praktisch unveränderlich erscheinen lassen. Die Stickstoffkonzentration ist deshalb unveränderlich, und der Stickstoff beteiligt sich nicht an der Diffusion. Wenn man die Betrachtung ganz eingehend durchführt, ergibt sich, daß der Stickstoff nach der Seite der größeren Sauerstoffkonzentration, also nach dem Gaskern diffundiert.

In der obigen Grundgleichung der Diffusion sollen nun statt der Dichte  $\gamma$  die Volumhunderteile des Sauerstoffes eingeführt werden, und zwar sollen die chemischen Zeichen neben der Art des Gases auch dessen Raumteil in der Volumeneinheit des Gases angeben. Ist  $p_1$  der

Teildruck des Sauerstoffes und  $p$  der Gesamtdruck, so ist der Raumteil des Sauerstoffes (numerische Konzentration oder Molenbruch)

$$O_2 = \frac{p_1}{p}$$

Nach der Gasgleichung ist

$$\gamma = \frac{p_1 \mu}{RT}$$

wenn  $\mu$  das Molekulargewicht,  
 $R$  die Gaskonstante 848 und  
 $T$  die absolute Temperatur bedeuten.

Das Grundgesetz der Diffusion geht dann über in

$$dG = k df dz \frac{\mu p dO_2}{848 T ds}$$

Ist  $V$  das Sauerstoffvolumen beim Zustande  $p$  und  $T$ , so ist

$$Vp = \frac{G}{\mu} 848 T$$

und

$$dG = \frac{\mu p}{848 T} dV$$

Damit geht die Grundgleichung der Diffusion über in

$$dV = k df dz \frac{dO_2}{ds}$$

Ist der Zustand mit der Zeit nicht veränderlich, so kann man über die Zeit integrieren und erhält das in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit diffundierende Gasvolumen

$$V = k \frac{dO_2}{ds}$$

d. h. der in der Stunde durch die Flächeneinheit diffundierende Gasraum (beim Gesamtdruck gemessen) ist dem Gefälle der numerischen Sauerstoffkonzentration proportional. Die Kohlendioxid diffundiert in der andern Richtung. Da der Gesamtdruck gleichbleibend ist und auch die Stickstoffkonzentration sich praktisch nicht ändert, wird

$$-\frac{dCO_2}{ds} = \frac{dO_2}{ds}$$

und ebenso

$$dV = dV'$$

wenn  $dV'$  das in der gleichen Zeit diffundierende Kohlendioxidvolumen ist

Daraus folgt, daß die Diffusionszahlen für Kohlendioxid und Sauerstoff die gleichen sind.

Die Diffusionszahl  $k$  ist proportional dem Quadrate der absoluten Temperatur und umgekehrt proportional dem Gesamtdruck; ist sie beim Zustande  $p_0$  und  $T_0 = k_0$ , so ist sie bei  $p$  und  $T$

$$k = k_0 \frac{p_0}{p} \frac{T^2}{T_0^2}$$

daraus folgt

$$\frac{p}{T} = \frac{k_0 T p_0}{k T_0^2}$$

Durch die Verbrennung von 1 Mol Kohlenstoff (12 kg) werden 1 Mol Sauerstoff (32 kg  $O_2$  oder 24,4 cbm bei 15° und 1 at) verbraucht. Es verbrennen deshalb in der Stunde auf 1 qm der Kohlenoberfläche

$$K = \frac{Vp \cdot 288 \cdot 12}{T \cdot 10000 \cdot 24,4} = 0,01416 \frac{Vp}{T} \text{ kg}$$

Kohle oder nach Einführung obiger Werte für  $V$  und  $\frac{p}{T}$ :

$$K = 0,01416 \frac{k_0 p_0 T}{T_0^2} \frac{dO_2}{ds} \text{ kg}$$

In dieser Gleichung ist  $T$  die Temperatur der Kohlenoberfläche und  $\frac{dO_2}{ds}$  das Gefälle der Konzentration des Sauerstoffes an ihr. Die stündlich verbrannte Kohle ist deshalb nur abhängig von der Temperatur und dem Sauerstoffgefälle. Sie ist beiden proportional. Die Temperatur ist ein geläufiger Begriff und auch leicht meßbar. Aber das Sauerstoffgefälle ist zunächst nur eine Rechnungsgröße.

Das Sauerstoffgefälle ist in erster Linie von der mechanischen Strömung, insbesondere von deren Wirbelung abhängig. *Es lassen sich nun glücklicherweise Vergleiche mit einem andern Naturvorgang, der genauer untersucht ist und*

den gleichen Grundgesetzen gehorcht, anstellen. Die Übertragung der Wärme von einer festen Wand an ein an ihr entlang strömendes Gas befolgt dieselben Gesetze wie die Diffusion in Gasen. Ist  $\lambda$  die Wärmeleitzahl des Gasstromes bei der Temperatur der Wand  $T$  und  $\Theta$  die Temperatur des Gases, so ist die von dem Gas nach dem Flächenelement  $df$  der Wand strömende Wärme

$$Q = \lambda df dz \frac{d\Theta}{ds}.$$

Ersetzen wir darin  $Q$  durch  $V$ ,  $\lambda$  durch  $k$  und  $\Theta$  durch  $O_2$ , so geht sie in die Diffusionsgleichung über. Greifen wir im Gasstrom ein Raumelement heraus, so wird durch dessen Begrenzung Sauerstoff hinein- und herausdiffundieren. Außerdem wird aber auch durch die mechanische Strömung Sauerstoff in das Element ein- und austreten. Die über die ganze Oberfläche des Volumenelementes addierte Sauerstoffströmung bedingt dann eine Änderung der Sauerstoffkonzentration des eingeschlossenen Gasvolumens. Diese Betrachtung liefert eine Differentialgleichung, die der Fourierschen Gleichung der Wärmeübertragung in strömenden Medien vollkommen entspricht. Dazu treten die Differentialgleichungen der Strömung, die Stetigkeitsgleichung und die Navier-Stockesschen dynamischen Gleichungen, die für beide Probleme identisch sind. Damit auch die Grenzbedingungen gleich werden, hat man die Temperatur  $\Theta$  von der Wandtemperatur aus zu zählen. Beim Wärmeübergang ist die Temperatur an der Wand null, und bei der Verbrennung bzw. der Diffusion ist an der Wand die Sauerstoffkonzentration  $O_2$  gleich null.

Man kann deshalb die Lösung dieses Diffusionsproblems aus der Lösung einer Aufgabe der Wärmeübertragung herleiten. Auf dem Gebiete des Wärmeüberganges sind für eine Reihe von Fällen die Lösungen durch Versuche bestimmt worden. Es erwies sich als zweckmäßig, aus den Versuchen die sogenannte Wärmeübergangszahl  $\alpha$  zu berechnen. Das ist jene Wärmemenge, die in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit der Oberfläche ausgetauscht wird, wenn der Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche und der mittleren Gastemperatur

einen Grad beträgt. Demzufolge ist die in der Zeit  $z$  durch die Fläche  $F$  strömende Wärme

$$Q = \alpha F z u_m,$$

wenn  $u_m$  der mittlere Temperaturunterschied ist.

Eine der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  analoge Größe will ich für die Diffusion und die Verbrennung einführen, die ich die Verbrennungszahl nenne und mit  $\beta$  bezeichne. Sie gibt an, wieviel Raumeinheiten Sauerstoff in der Zeiteinheit für die Flächeneinheit zur Verbrennung gebraucht werden, wenn die mittlere Sauerstoffkonzentration im Querschnitt 1 ist. Dann wird das in  $z$  Stunden auf  $F$  qm entstehende Kohlen säurevolumen, das ja gleich dem verbrauchten Sauerstoffvolumen ist,

$$V = \beta F z O_2^m.$$

Diese Gleichung möge die dynamische Verbrennungsgleichung genannt werden. Sie sagt aus, daß das durch die Verbrennung entstehende Kohlen säurevolumen proportional der Zeit, der Kohlenoberfläche, der mittleren Sauerstoffkonzentration  $O_2^m$  und der Verbrennungszahl  $\beta$  ist. Die Dimension von  $\beta$  ist  $mst^{-1}$ .

Ich will jetzt auf den Fall übergehen, den ich selbst für den Wärmeübergang durch Versuche und theoretisch untersucht habe. Das Gas soll durch ein Rohr strömen, das aus fester Kohle gebildet sei. Der Durchmesser sei  $d$  und die Länge des Rohres  $L$ . Durch künstliche Mittel möge es auf der stets gleichen Temperatur  $T$  gehalten werden. Die Änderung der Konzentration der durch das Rohr strömenden Verbrennungsgase sei gering.

Nun ist nach meinen Versuchen für ein Rohr die Wärmeübergangszahl

$$\alpha = \frac{18,86 \lambda^{0,214}}{d^{0,18} L^{0,054}} (w \gamma c_p)^{0,786} \frac{WE}{st \text{ qm } ^\circ C}.$$

Um daraus die Diffusionszahl für ein Rohr zu erhalter, braucht man nur für  $\lambda$   $k$  zu setzen, und da für die Wärmeübertragung für ein Volumenelement der Energiesatz

$$dQ = dx dy dz \lambda c_p d\Theta$$

lautet und für die Diffusion, die dieser entsprechende Gleichung

$$dV = dx dy dz dO_2$$

gilt, ist  $\gamma c_p = 1$  zu setzen.

Es wird also für ein Rohr die Verbrennungszahl

$$\beta = \frac{18,86 k^{0,214} w^{0,786}}{d^{0,16} L^{0,054}} \text{ m/st.}$$

$w$ , die mittlere Geschwindigkeit, ist hier in  $\text{msk}^{-1}$ ,  $L$  und  $d$  in m und  $k$  in  $\text{qm/st}$  einzusetzen.

Führt man noch die Diffusionszahl  $k_0$  bei  $0^\circ$  und 1 at ein,

$$k = k_0 \frac{T^2}{273^2} \frac{10\,000}{p},$$

worin  $p$  der Gasdruck in  $\text{kg/qm}$  ist, so geht die Gleichung über in

$$\beta = 12,27 \frac{T^{0,428} w^{0,786} k_0^{0,214}}{d^{0,16} L^{0,054} p^{0,214}}.$$

Setzen wir diesen Wert in obige Gleichung ein, so ist in einem Rohr oder einer Gruppe von Kohlenrohren die in  $z$  Stunden auf  $F$   $\text{qm}$  der Kohlenoberfläche verbrannte Kohle in  $\text{kg}$

$$K = \frac{p}{T} \frac{141,6}{10\,000} \beta F z O_2$$

$$= 0,1736 \frac{k_0^{0,214} p^{0,786} w^{0,786} F z O_2}{T^{0,472} d^{0,16} L^{0,054}}$$

Bei sonst gleichen Verhältnissen nimmt also das verbrannte Kohlegewicht mit der Luftgeschwindigkeit zu und ist proportional der Sauerstoffkonzentration. Führt man das durch das Rohr in der Stunde strömende Gasvolumen (bei  $15^\circ$  und  $10\,000 \text{ kg/qm}$  gerechnet)  $W_0$  ein, so wird, da

$$\frac{W_0 T}{288 p} \frac{10\,000}{10\,000} = \frac{d^2 \pi}{4} w \quad 3600,$$

$$\frac{w p}{T} = \frac{W_0}{288} \frac{10\,000 \cdot 4}{d^2 \pi \cdot 3600}$$

$$= 0,01229 \frac{W}{d^2} :$$

$$K = \frac{4,52}{10^5} \frac{k_0^{0,214} T^{0,214} W_0^{0,786}}{d^{1,732} L^{0,054}} F z O_2.$$

Um ein Beispiel zu geben, werde angenommen

$$p = 1 \text{ at} = 10\,000 \text{ kg/qm}$$

$$w = 10 \text{ m/sk}$$

$$F = 1 \text{ qm}$$

$$z = 1 \text{ st}$$

$$O_2 = 0,21$$

$$T = 1700^\circ$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$

$$L = 1,0 \text{ m}$$

$$k_0 = 0,064 \text{ qm/st.}$$

Dann verbrennen auf 1  $\text{qm}$  Kohlenoberfläche in der Stunde

$$K = 0,1736 \cdot \frac{0,064^{0,214} \cdot 10\,000^{0,786} \cdot 10^{0,786} \cdot 0,21}{1700^{0,472} \cdot 0,05^{0,16} \cdot 1^{0,054}}$$

$$= \frac{0,1736 \cdot 0,882 \cdot 1410 \cdot 6,13 \cdot 0,21}{31,8 \cdot 9,26 \cdot 1} = 9,45 \text{ kg/st.}$$

Setzt man die Dichte der Kohle gleich 1,25, so wird in der Stunde eine Schicht von 7,55 mm abbrennen.

Ist die Abnahme der Sauerstoffkonzentration merklich längs des Rohres, so ist die hier angewandte Formel durch eine andere zu ersetzen, die man dadurch gewinnt, daß man die dynamische Verbrennungsgleichung für ein Längenelement des Rohres  $dF$  ansetzt. Es gilt dafür

$$dV = \beta O_2 dF,$$

wobei  $\beta$  die mittlere Verbrennungszahl im Rohr und  $O_2$  die Sauerstoffkonzentration an der Stelle  $dF$  ist. Außerdem ist aber

$$dV = -W dO_2,$$

wenn mit  $W$  das in der Stunde durch das Rohr strömende Gasvolumen im Zustande  $p$  und  $T$  ist. Es wird jetzt

$$W dO_2 = \beta O_2 dF$$

oder

$$\frac{dO_2}{O_2} = \frac{\beta}{W} dF$$

und integriert

$$\ln O_2 = -\frac{\beta F}{W} + C.$$

Setzt man die Konzentration des Sauerstoffes am Eintritt  $O_2^1$  und am Austritt  $O_2$ , so wird

$$\ln \frac{O_2}{O_2^1} = - \frac{\beta F}{W}$$

and

$$O_2 = O_2^1 e^{-\beta F/W}.$$

Damit ist die Abnahme der Sauerstoffkonzentration und die an einem Flächenelement verbrannte Kohle längs des Rohres bekannt.

Obige Gleichung für die Verbrennungszahl  $\beta$  gilt bloß für röhrenförmige Körper. Nach der Kenntnis des Wärmeüberganges gelten für anders gestaltete Körper ähnliche Gesetze.<sup>1</sup> Leider sind sie hierfür nicht genau genug durch Versuche sicher gestellt. Insbesondere ist für einen geschichteten Körper, den die Kohle über dem Rost darstellt, nichts ermittelt. Wenn somit auch quantitativ die Ergebnisse obiger Gleichung, angewendet auf die Verbrennung der Kohle über dem Rost, nicht genau stimmen werden, so geben sie doch sicher qualitativ ein annähernd richtiges Bild der Verbrennung, und nur darauf kommt es mir hier zunächst an.

Bisher wurde die Temperatur der Kohle immer als bekannt vorausgesetzt. Sie wechselt natürlich an verschiedenen Stellen über dem Rost. Nachdem nun in der Verbrennungszahl ein Begriff gefunden worden ist, der die Verbrennung regelt, können jetzt ganz allgemein die Gleichungen für die Verbrennung über dem Rost aufgestellt werden. Es seien alle Größen nur von dem Abstand  $x$  über dem Rost abhängig. Die zugeführte Luftmenge sei gleichbleibend, und auch die Schütthöhe bleibe unverändert dadurch, daß durch eine Wurffeuering dauernd beschickt werde. In der ganzen Brennstoffschicht bleibt dann der Zustand unverändert, d. h. an allen einzelnen Stellen herrscht dauernd derselbe Zustand.

Greift man ein Volumenelement von der Dicke  $dx$  heraus, so müssen für dieses zwei Bedingungen erfüllt sein: Es müssen die Sätze von der Erhaltung der Energie und der Masse bestehen, d. h.

in dem Element darf keine Ansammlung von Energie oder von Masse stattfinden. Ebenso wenig darf solche verschwinden. Der Unterschied zwischen der zu- und abströmenden Energie muß gleich der frei werdenden Verbrennungswärme sein.

Es sei  $n$  die Anzahl der stündlich auf 1 qm des Rostes zugeführten Luftmole. Da sich bei der Verbrennung die Molzahl nicht ändert, strömt durch jeden Querschnitt  $x$  die gleiche Anzahl Mole mit den Verbrennungsgasen. Ist  $T$  die Temperatur an dieser Stelle und  $C$  die Molekularwärme der Gase daselbst, so strömt mit den Gasen durch die Ebene im Abstand  $x$  vom Rost ein Wärmeinhalt

$$J = nCT.$$

$C$  ist natürlich von der Gaszusammensetzung und der Temperatur abhängig, wechselt also mit  $x$ . Die Zunahme des Wärmeinhaltes längs  $dx$  sei  $dJ$ . Die Kohle sinkt abwärts, und zwar mögen  $m$  Mole durch die Ebene  $x$  treten.  $m$  ändert sich mit  $x$ . Für  $x = 0$  ist auch  $m = 0$ , d. h. durch den Rost soll keine Kohle fallen. Ist  $c$  die Molekularwärme der Kohle, so ist ihr Wärmeinhalt

$$i = cmT$$

Sein Zuwachs längs  $dx$  sei  $di$ .

Ferner wird die Wärme durch Leitung übertragen. Ist  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit der Kohlschicht, so strömt durch die  $x$ -Ebene die Wärme

$$q = \lambda \frac{dT}{dx}$$

gegen den Rost. Das Differential  $dq$  strömt mehr von oben ein als unten aus.

Durch die Verbrennung wird Wärme in dem Element erzeugt. Ist  $h$  der Heizwert von 1 Mol Kohle, so wird in der Schicht  $dx$  die Wärme

$$dQ = h dm$$

erzeugt. Nach dem Energieprinzip muß dann sein

$$dJ + di + dq - dQ = 0$$

und integriert

$$J + i + q - Q = C_1 \quad (1)$$

1. Mit den Ergebnissen meines inzwischen erschienenen Aufsatzes, „Das Grundgesetz des Wärmeüberganges“ *Gesundheitsingenieur* 1915, kann die Verbrennung in ruhender Luft behandelt werden.

Auf Grund der am Anfang aufgestellten dynamischen Verbrennungsgleichung ist die in der Stunde Volumenelement  $dx$  verbrannter Kohle

$$dm = \beta O_2 dx,$$

wenn  $O_2$  die Sauerstoffkonzentration der Verbrennungsgase an der Stelle  $x$  ist, oder als Differentialgleichung geschrieben:

$$\frac{dm}{dx} = \beta O_2 \quad (2)$$

Der Satz von der Erhaltung der Materie verlangt, daß alle in dem Element verbrannte Kohle dieses als Kohlensäure verläßt. Das ergibt die Bedingung:

$$dm = -n dO_2 \quad (3)$$

Da  $n$  unveränderlich ist, kann integriert werden. Es wird

$$m = -nO_2 + C_2 \quad (3)$$

Damit sind drei Gleichungen gewonnen, die genügen, um die drei unbekanntenen Größen  $m$ ,  $T$ ,  $O_2$ , als Funktionen von  $x$  zu erhalten. Bei der Integration treten 4 Integrationskonstanten auf, die durch die folgenden Bedingungen bestimmt werden:

(1) Für  $x = 0$  muß  $m = 0$  sein, d. h. es darf keine unverbrannte Kohle durch den Rost fallen.

(2) Für  $x = 0$  muß  $O_2$  bei der Verbrennung in Luft = 0,21 sein.

(3) Am Rost, also für  $x = 0$  möge die Wärme  $S_1$  durch Leitung an die Roststäbe und durch Strahlung an den Aschenfall abgegeben werden. Die Verbrennungsluft trete mit  $T_1^0$  unter den Rost. Dann muß sein

$$\lambda \frac{dT}{dx} = S_1 + nC(T - T_1).$$

(4) Am oberen Ende der Brennschicht mögen  $S_2$  Wärmeeinheiten an die Kesselwand abgestrahlt werden. Ist  $T_2$  die Temperatur der frischen Kohle, so liefert der Energiesatz dort die Beziehung

$$x = H; \quad \lambda \frac{dT}{dx} = S_1 + mc(T - T_2).$$

Führt man aus Gleichung (3)  $m$  in die Gleichung ein und setzt in erster Annäherung  $\beta$  für die (2) ganze Brennschicht unveränderlich, so wird bei Berücksichtigung der Grenzbedingungen

$$O_2 = 0,21 e^{-\frac{\beta}{n}x}$$

Der Sauerstoffgehalt nähert sich also nach einer Exponentialfunktion dem Wert null, allerdings erst für unendliche Schütthöhe. In der untersten Zone verbrennt demnach am meisten Kohle; je weiter man nach oben geht, desto weniger lebhaft ist die Verbrennung auf die Längeneinheit. Ebenso wie ein kaltes Gas, das durch ein warmes Rohr strömt, auf Grund der Rechnung erst bei unendlicher Länge die Temperatur der Rohrwand annimmt, braucht man bei der Verbrennung eine unendliche Schütthöhe, um allen Sauerstoff zu verbrennen. Praktisch ist aber schon für eine endliche Schütthöhe aller Sauerstoff verbrannt. Über dieser bildet sich sodann Kohlenoxyd, wobei Wärme gebunden wird.

Ist Kohlensäure in Berührung mit fester Kohle, so stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, derart, daß ein Teil der Kohlensäure in Kohlenoxyd zerfällt, und zwar besteht für jede Temperatur eine bestimmte und bekannte Konzentration. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Kohlenoxyd ist vorhanden.

Die Schütthöhe möge jetzt so groß angenommen werden, daß die Höhe, bis zu der aller Sauerstoff verbrannt ist, überschritten wird. Es bildet sich dann Kohlenoxyd, und man spricht nicht mehr von einer Verbrennung, sondern von einer Vergasung des Brennstoffes, weil ein brennbares Gas entsteht. Der Vorgang der Vergasung findet folgendermaßen statt: In jener Grenzhöhe ist die Kohlensäurekonzentration 0,21 und die des Sauerstoffes null. An der Oberfläche verbrennt die Kohle jetzt nach der Gleichung



und zwar ist es sehr wahrscheinlich, daß sich an der Oberfläche die der Temperatur entsprechende Gleichgewichtskonzentration einstellt. Dann sind dort die Kohlensäure- und Kohlenoxydkonzentration nur von der Temperatur abhängig. Die weitere Vergasung geht dann so

vor sich, daß Kohlenoxyd von der Kohlenoberfläche nach dem Kern des Gasstromes diffundiert, während in dieser Zone die Kohlen-säure aus dem Kern gegen die Wand strömt. Eine Abbildung des Vorganges durch ein Problem des Wärmeüberganges ist aber jetzt nicht mehr möglich, da an der Wand aus einem Raumteil Kohlen-säure 2 Raumteile Sauerstoff werden. Es ist jetzt eine Strömung vorhanden, bei der an der Begrenzungswand Quellen sitzen, da an der Wand durch den Vergasungsvorgang eine Vergrößerung des Volumens stattfindet. Die Konzentration verteilt sich nach Abb. 4.

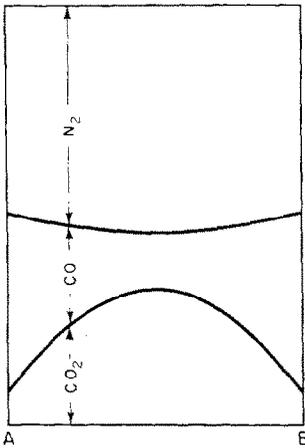


ABB. 4. Änderung der Gaszusammensetzung in einem Horizontalquerschnitt der Vergasungszone.

Ist  $V$  das in 1 st und auf 1 qm der Kohle erzeugte Kohlenoxydvolumen, so entsteht dort an der Wand eine Volumenvergrößerung von  $\frac{1}{2}V$ , und demzufolge strömt das Gas von der Wand mit der Geschwindigkeit  $w = \frac{1}{2}V \frac{1}{3600}$  m/sk gegen den Kern. Da CO der Anteil von Kohlenoxyd an 1 cbm ist, werden auf 1 qm  $\frac{V}{2}$  CO cbm Kohlenoxyd durch sichtbare Strömung in das Gas geleitet. Dazu kommt die Abgabe von Kohlenoxyd durch Diffusion im Betrage von

$$k \frac{dCO}{ds}$$

Beide zusammen geben das erzeugte Volumen Kohlenoxydgas. Es wird also

$$V = k \frac{dCO}{ds} + \frac{V}{2} CO$$

oder

$$V \left( 1 - \frac{CO}{2} \right) = k \frac{dCO}{ds}$$

Aus dieser Formel kann das erzeugte Volumen Kohlenoxyd und damit die dadurch verbrannte Kohle bestimmt werden, wenn das Konzentrationsgefälle des Kohlenoxydes an der Wand bekannt ist. Ähnlich wie bei der Verbrennung kann man dann bei der Vergasung eine Vergasungszahl  $\gamma$  einführen, die uns sagt, daß an der Kohlenoberfläche

$$k \frac{dCO}{ds} = \gamma (CO_0 - CO_m)$$

ist, wenn  $CO_0$  die Kohlenoxydkonzentration an der Kohlenoberfläche und  $CO_m$  die mittlere Kohlenoxydkonzentration im Gasstrom ist. Durch diesen Ansatz wird die vergaste Kohlenmenge proportional dem Unterschied der Kohlenoxydkonzentration an der Kohlenoberfläche und der mittleren Kohlenoxydkonzentration im Gasstrom gesetzt. Sind Werte von  $\gamma$  hierfür durch Versuche bestimmt, dann kann man wieder die Sätze von der Erhaltung der Energie und der Masse anwenden und durch deren Integration den Temperaturverlauf und die Änderung der Gaszusammensetzung in Generator bestimmen.

Obige Theorie hat aber einen Mangel. Es ist die Stelle, an der aller Sauerstoff aufgebraucht ist, an der also die Verbrennung in die Vergasung übergeht, nicht scharf bestimmt. Man kann ihn vermeiden, wenn man bei der Verbrennung ebenfalls an der Kohlenoberfläche das Vorhandensein des Kohlen-säuregleichgewichtes wie in der Vergasungszone annimmt. Das an der Kohlenoberfläche gebildete Kohlenoxyd diffundiert gegen den Kern der Verbrennungsgase und verbrennt mit dem vom Kern gegen die Wand diffundierenden Sauerstoff nach. Maßgabe einer endlichen Verbrennungsgeschwindigkeit. Die an einer Stelle im Gasraum entstehende

Kohlensäure folgt dann nach den Gesetzen der chemischen Dynamik der Gleichung

$$\frac{d[\text{CO}_2]}{dz} = f[\text{CO}]^2[\text{O}_2].$$

In dieser Gleichung ist  $f$  eine reine Temperaturfunktion;  $[\text{CO}_2]$ ,  $[\text{CO}]$  und  $[\text{O}_2]$  sind die molaren Konzentrationen von Kohlensäure, Kohlenoxyd und Sauerstoff an einer Stelle. Der Zusammenhang zwischen der molaren Konzentration einer Molekulgattung<sup>1</sup> und deren räumlicher Konzentration ist z. B. für Kohlensäure durch die Gleichung

$$[\text{CO}_2] = \text{CO} \frac{p}{RT}$$

gegeben, wenn  $R$  die Gaskonstante 848 und  $p$  der gesamte Druck in  $\text{kg/qm}$  sind.

Abb. 5 gibt die Änderung der Konzentration auf einer Senkrechten zur Kohlenoberfläche an. Die Kohlenoxyd führende Schicht an der Wand

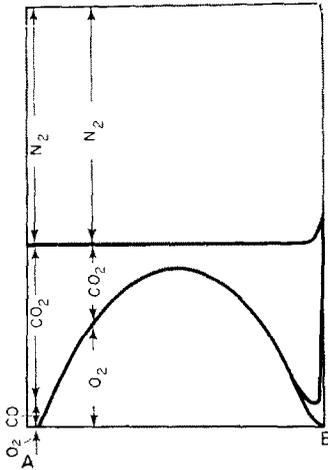


ABB. 5. Änderung der Gaszusammensetzung in einem Horizontalquerschnitt der Verbrennungszone.

wird praktisch außerordentlich klein sein, so daß sich das Bild bis auf diese Grenzschicht mit der Abbildung 3 decken wird. Bei dieser Annahme fällt jetzt Unterschied zwischen Verbrennung und Vergasung ganz fort. Beide Fälle sind in einer Gleichungsreihe enthalten. Aber die Zurückführung auf das Problem des Wärme-

1. d. i. die Anzahl Mole in der Raumeinheit.

überganges entfällt, und die Einfachheit der Verhältnisse verschwindet. Damit ist das Wesen der Vergasung von Kohlenstoff besprochen, wenn es sich um die Erzeugung von Luftgas handelt.

Es sollen jetzt noch die Vorgänge behandelt werden, die sich bei der Erzeugung von Mischgas abspielen. Es wird hier ein Gemisch von Wasserdampf und Luft unter dem Rost eingeblasen. Wie oben, so stehe ich auch hier wieder auf dem Standpunkt, daß ein chemischer Vorgang nur an der Oberfläche der Kohle stattfindet. In dem Gasraume zwischen den Kohleteilchen findet die Änderung der Gaszusammensetzung nur durch Diffusion statt.

In der unteren Zone verbrennt wieder Kohle zu Kohlensäure. Es kann meines Erachtens kein Kohlenoxyd und auch kein Wasserstoff bestehen, so lange noch Sauerstoff vorhanden ist, denn bei der in der Verbrennungszone herrschenden Temperatur ist die Affinität zum Sauerstoff so groß, daß beide Gase augenblicklich verbrennen. Die Wasserdampfkonzentration ist deshalb gleichbleibend, und Kohlensäure diffundiert von der Wand nach innen, s. Abb. 6.

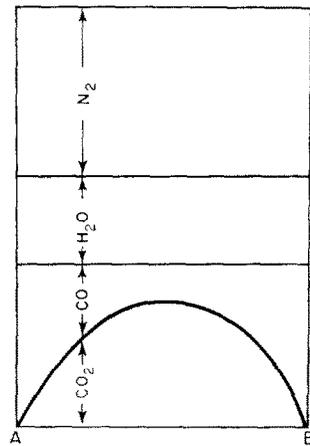
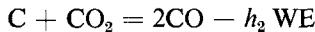


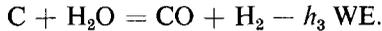
ABB. 6. Änderung der Gaszusammensetzung in einem Horizontalquerschnitt der Verbrennungszone bei der Erzeugung von Mischgas.

In einer gewissen Höhe über dem Rost ist aller Sauerstoff verbrannt, und es ist ein Gemisch von Wasserdampf, Kohlensäure und Stickstoff vorhanden. Von hier an setzt eine andre Reaktion

ein. An der Wand geht die Vergasung der Kohle nach folgenden beiden Gleichungen vor sich:



und



Es wird also bei beiden Reaktionen Wärme verbraucht, die von der Temperatur abhängig ist. Bei 15° ist

$$h_2 = 38\,250 \text{ WE}$$

und

$$h_3 = 27\,930 \text{ WE.}$$

An der Kohlenoberfläche treten beide Reaktionen auf und verlaufen sehr schnell bis zum chemischen Gleichgewicht, das verlangt, daß die beiden Brüche

$$\frac{[CO]^2}{[CO_2]} = K_1(T)$$

und

$$\frac{[CO][H_2]}{[H_2O]} = K_2(T)$$

eindeutige Funktionen der Temperatur sind. Zieht man beide Reaktionsgleichungen voneinander ab, so erhält man die sogenannte Wassergasreaktion



wobei

$$h_4 = 10\,320 \text{ WE}$$

ist.

Diese Gleichung wird vielfach als ausschlaggebend für die Vergasung im Gaserzeuger bezeichnet. Sie stellt aber eine homogene Reaktion dar, und meines Erachtens sind im Gaserzeuger die Temperaturen zu tief und die Zeiten zu klein, als daß im Gaserzeuger eine Reaktion nach der Wassergasgleichung stattfinden könnte. Man hat sich vielmehr den Vorgang so vorzustellen, daß an der glühenden Kohle die Vergasung nach obigen beiden Gleichungen bis zum Gleichgewicht stattfindet. Die gebildeten Gase CO und H<sub>2</sub> diffundieren dann in das an der Kohle entlang strömende Gas, während aus dessen Kern CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O gegen die glühende Kohle diffundieren und dort die Kohle vergasen. Die Schnelligkeit der Vergasung hängt nur von der Diffusionsgeschwindigkeit ab. Im Gasraum diffundieren jetzt die fünf Gase N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und H<sub>2</sub>. Bevor eine weitere analytische Behandlung der Vergasungsfrage möglich ist, muß zuerst die Diffusion von Gasen des näheren durch Versuche geklärt werden.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Es wird gezeigt, daß die Verbrennung und Vergasung von Kohle auf dem Rost wesentlich physikalische Fragen sind. Die sichtbare und die molekulare Strömung (Diffusion) leiten diese Vorgänge. Die Verbrennung der Kohle wird durch eine Aufgabe der Wärmeübertragung abgebildet und dadurch gelöst.