

# WERTUNG DER AUS DER RAUCHGASANALYSE GEWONNENEN DATEN BEI ÖLFEUERUNGSANLAGEN

Von

E. KISS

Lehrstuhl für Kalorische Maschinen, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 17. Juli 1969)

Vorgelegt von Prof. Dr. D. BRODSZKY

## I. Vorbemerkungen

Für die Sicherung der optimalen Verbrennung und des Betriebs sind vom Inbetriebhalter und von den die Einregelung durchführenden Organen eine Reihe von Kennwerten der Feuerungstechnik einzustellen bzw. durch Messungen zu bestimmen.

Diese Kennwerte sind:

- CO<sub>2</sub>-Gehalt
- O<sub>2</sub>-Gehalt
- CO-Gehalt
- H<sub>2</sub>-Gehalt
- Rußzahl
- Luftüberschuß
- Luftzug
- Rauchgastemperatur, usw.

Die Güte der Verbrennung wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Vorbedingung zu deren Prüfung ist vor allem die Zusammensetzung des Brennstoffes und auf dieser Grundlage die stöchiometrische Prüfung der Verbrennung.

Die stöchiometrischen Gleichungen der Verbrennung werden in zahlreichen Fachbüchern ausführlich behandelt. So lassen sich bei gegebener Zusammensetzung des Brennstoffes bestimmen: die spezifischen Werte des Luftbedarfs und der entstehenden Rauchgasmenge bzw. die bei der Verbrennung freiwerdende Wärmemenge.

In den zur Verbrennung bestimmten Ölsorten ist im größten Gewichtsprozent-Verhältnis Karbon vorhanden, deshalb stellt, in der Annahme einer vollkommenen Verbrennung, hinsichtlich der Güte der Verbrennung die Erreichung eines hohen CO<sub>2</sub>-Gehalts ein erstrangiges Ziel dar. Dazu muß in erster Linie der theoretische CO<sub>2max</sub>-Wert bekannt sein, der schon auf Grund der Ölzusammensetzung ermittelt werden kann.

- Im weiteren sind die folgenden Voraussetzungen gültig:
- die Verhältnisse beziehen sich auf das trockene Abgas;
  - die Näherung  $-c + h = 1$  — ist für Öle bedingt.

## II. Verbrennung und Ostwald-Dreieck

Vor allem muß auf den Unterschied zwischen unvollkommener Verbrennung und nicht vollständiger Verbrennung hingewiesen werden. *Nicht vollständige Verbrennung* bedeutet, daß ein Teil des Brennstoffes an der Verbrennung nicht beteiligt ist.

Eine *unvollkommene Verbrennung* tritt hingegen auf, wenn ein Teil des Brennstoffes (z. B. das Karbon) nur zu Kohlenmonoxyd verbrennt und die entstandene Verbrennungswärme geringer ist als jene, mit der bei vollkommener Verbrennung gerechnet wird.

Eine unvollkommene Verbrennung kann auch bei einem Luftverhältnis  $m > 1$  vorliegen, was durch das auf analytischem Wege nachweisbare gleichzeitige Vorhandensein von freiem Sauerstoff und Kohlenmonoxyd im Rauchgas bewiesen wird.

Bei praktischen Berechnungen sind nachstehende Ausdrücke gebräuchlich:

$$\text{CO}_{2\text{max}} = \frac{0,21}{\beta} \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$\text{CO}_{\text{max}} = \frac{0,21}{(\beta - 0,395)} \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$\text{O}_{2\text{max}} = 0,21 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

wo

$$\beta = 1 + 2,37 \frac{h - o/8}{C}$$

$h$  — Wasserstoffgehalt kp/kp

$o$  — Sauerstoffgehalt kp/kp

$C$  — Karbongehalt kp/kp     bedeuten.

Bei der Einregulierung der Feuerungsanlagen und der Kontrolle ihres Betriebes können die Verhältnisse mit dem wohlbekannten Ostwald-Dreieck nachgebildet werden (Abb. 1). Hierbei wird auf die eine Kathete der Wert von  $\text{CO}_{2\text{max}}$ , auf die andere der von  $\text{O}_{2\text{max}}$  aufgezeichnet. Die so erhaltene Hypotenuse wird den geometrischen Ort jener Punkte darstellen, wo eine vollkommene Verbrennung möglich ist (in den Fällen  $m = 1$  und  $m > 1$ ).

Die vom 0-Punkt auf die Hypotenuse gezogene Senkrechte ergibt die Größe von  $\text{CO}_{\text{max}}$ . Der CO Gehalt ist auf der Hypotenuse gleich Null.

Ein beliebiger im Felde des Dreiecks aufgenommener Punkt stellt einen Fall dar, wo im Rauchgas CO vorhanden, die Verbrennung also unvollkommen ist.

Dieser Fall kann sich einstellen wegen Luftmangel, wenn  $m < 1$ , oder bei Luftüberschuß, wenn  $m > 1$ , die Verbrennungsluft sich jedoch mit dem Brennstoff nicht vermischte. Für einen beliebigen Punkt der Ebene des Dreiecks kann nachgewiesen werden, daß

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_{2\text{max}}} + \frac{\text{O}_2}{\text{O}_{2\text{max}}} + \frac{\text{CO}}{\text{CO}_{\text{max}}} = 1 \text{ ist.}$$

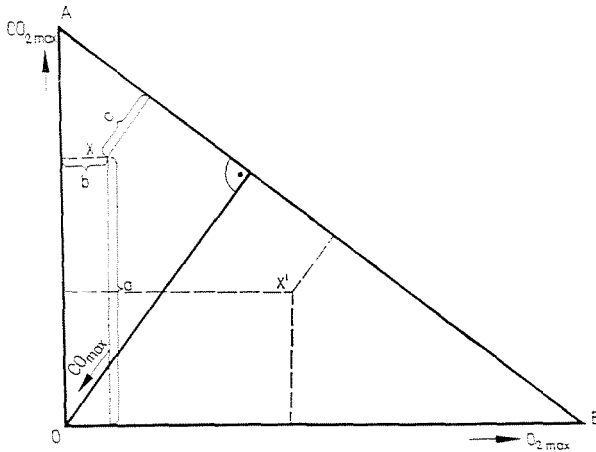


Abb. 1

Das Dreieck wird durch die Gerade  $m = 1$  in zwei Teile geteilt (Abb. 2). Rechts von der Geraden liegen die einem *Luftüberschuß*, links davon die einem *Luftmangel* entsprechenden Zustände. Die Gerade  $m = 1$  schneidet die Achse  $\text{O}_2$  und diese von der Hypotenuse (zur Hypotenuse eine Parallele gezogen) gerechnete Entfernung bedeutet den gerade im Schnittpunkt, bei  $m = 1$  entstehenden maximalen CO-Gehalt. Der ausgeschnittene  $\text{O}_2$ -Gehalt stellt jene Sauerstoffmenge dar, die bei der Verbrennung von C zu CO *frei bleibt*. In diesem Punkt entsteht kein  $\text{CO}_2$  (dies ist ein theoretischer Fall). Wie schon erwähnt, stellt die Hypotenuse des Ostwald-Dreiecks jene Fälle dar, in welchen sich die Verbrennungsluft mit dem Brennstoff *vermischt* hat, d. h. die *Verbrennung vollkommen* ist. Für diese Fälle besteht einerseits der theoretische Fall  $m = 1$ , wo die Zusammensetzung des Rauchgases

$$100 = \text{CO}_2 + \text{N}_2 \text{ ist.}$$

andererseits ist in tatsächlichen Fällen  $m > 1$  und die Rauchgaszusammensetzung

$$100 = \text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2.$$

Ist die *Vermischung* der Verbrennungsluft mit dem Brennstoff *nicht vollkommen*, also bei *unvollkommener Verbrennung* mit  $m = 1$ ,  $m > 1$ ,  $m < 1$ , so ist die Rauchgaszusammensetzung

$$100 = \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{O}_2 + \text{N}_2.$$

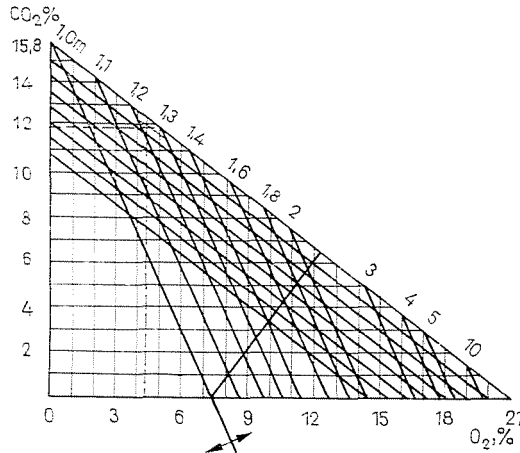


Abb. 2

Dies gilt für jeden Punkt der Fläche des Ostwald-Dreiecks. (Es gilt natürlich nicht für die begrenzenden Geraden.)

Es müssen auch noch weitere (die Praxis nicht interessierende Fälle) erwähnt werden.

In dem einen Falle gelten für die  $\text{CO}_2$ -Kathete des Dreiecks  $m < 1$  und

$$100 = \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{N}_2,$$

für die  $\text{O}_2$ -Kathete

$$m > 1$$

$$m = 1 \text{ und } 100 = \text{CO} + \text{O}_2 + \text{N}_2$$

$$m < 1$$

Für Punkt A sind  $m = 1$  und  $100 = \text{CO}_2 + \text{N}_2$ ,

für Punkt B  $m > 1$  und  $100 = \text{O}_2 + \text{N}_2$  geltend.

### III. Der Gebrauch des Ostwald-Dreiecks

#### a) Vollkommene Verbrennung

Aus Abb. 3 (Punkt 1) ist zu ersehen, daß als Ergebnis der  $\text{CO}_2$ - und  $\text{O}_2$ -Messungen der  $\text{CO}$ -Gehalt gleich Null und das Luftverhältnis  $m > 1$  ist.

Durch den Einbruch von Falschluff wird Punkt 1 nur in Punkt 1' verschoben.

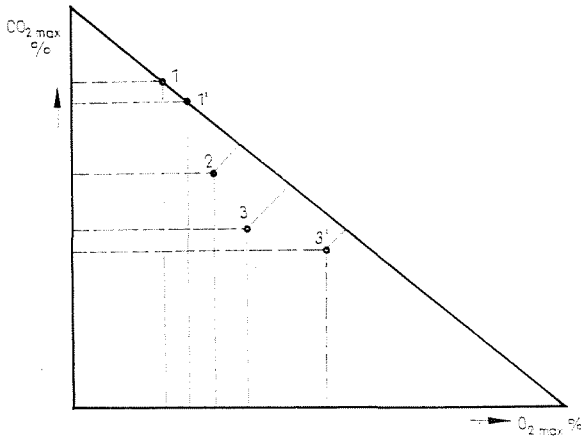


Abb. 3

#### b) Die Verbrennung ist unvollkommen

Aus der vorhin erwähnten Abbildung ergibt sich auf Grund der Orsat-Analyse (Messung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$ ) auch der  $\text{CO}$ -Gehalt (Punkt 2).

#### c) Die Verbrennung ist unvollkommen und auf den nachgekuppelten Oberflächen bricht Falschluff ein

In der Abbildung zeigt z. B. Punkt 3 den Zustand hinter dem Feuerraum an. Nach dem Ergebnis der Messung ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) ist  $\text{CO}$  im Rauchgas. Die Rauchgasanalyse hinter einer entfernteren, nachgekuppelten Oberfläche (z. B. am Kesselende) durchgeführt, gelangt Punkt 3 in Punkt 3'. Diesmal haben sich die  $\text{CO}$ - und die  $\text{CO}_2$ -Mengen in Prozentanteilen vermindert, der  $\text{O}_2$ -Gehalt hat jedoch zugenommen.

Somit können also an der Rauchgasseite der Heizvorrichtung (z. B. Kessel) entlang auf Grund der Orsat-Analyse Ort und Ausmaß des Falschluffeinbruchs bestimmt werden. Die Anwendung des Ostwald-Dreiecks ist auch zur Beurteilung der Methode der Rauchgasanalyse und der Güte des

verwendeten Gerätes geeignet, wenn alle drei Kennwerte ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ) gemessen und die sich ergebenden Ungenauigkeiten analysiert werden. Die Kontrolle des Meßverfahrens besteht darin, daß alle drei Meßdaten in demselben Punkt liegen müssen. Im Falle einer unvollkommenen Verbrennung dient zur Bestimmung des Luftverhältnisses der Ausdruck

$$m = \frac{N_2}{N_2 = \frac{79}{21} \left( \text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2} \right)}$$

wo  $N_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  die im Rauchgas enthaltenen prozentuellen Mengen bedeuten.

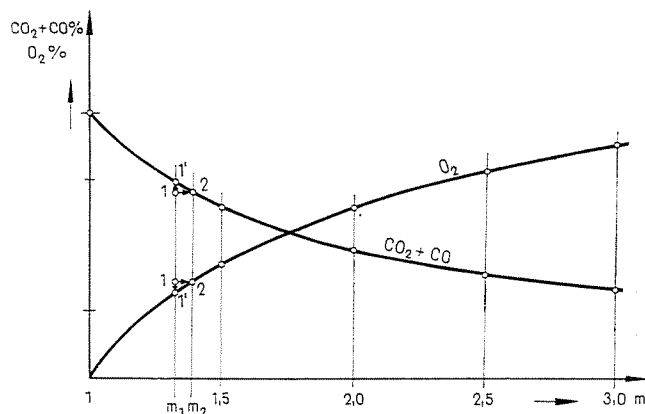


Abb. 4

Zur Beurteilung der Qualität der Verbrennung besteht eine gut anwendbare Methode in der Darstellung der zu den Punkten auf der Hypotenuse des Ostwald-Dreiecks gehörenden  $\text{CO}_2$ - und  $\text{O}_2$ -Werte als Funktion des Luftverhältnisses (Abb. 4). Werden auf die waagerechte Achse das Luftverhältnis aufgetragen und auf der senkrechten Achse die  $\text{CO}_2 + \text{CO}$ - und  $\text{O}_2$ -Werte (in Prozenten) dargestellt, erhält man zwei Kurven. Im Falle einer vollkommenen Vermischung, bei gegebenem Luftverhältnis müssen die aus den Meßdaten erhaltenen  $\text{CO}_2$ - und  $\text{O}_2$ -Werte auf den Kurven liegen.

Da jedoch in der Wirklichkeit (der unvollkommenen Vermischung wegen) stets mit einem geringen  $\text{CO}$  zu rechnen ist, liegen die Meßpunkte nicht direkt auf den Kurven, außerdem treten auch Meßfehler auf. Die Abweichung des gemessenen  $\text{CO}_2$  (bei gegebenem Luftverhältnis) von der Kurve ergibt den  $\text{CO}$ -Gehalt, d. h. das gemessene  $\text{CO}_2$  liegt bei unvollkommener Verbrennung immer unter der Kurve. Das Ergebnis der  $\text{O}_2$ -Messung liegt hingegen immer

über der Kurve, da sich nicht so viel Plus-Sauerstoff mit dem Brennstoff vermengt, was auch durch die Entstehung von CO angezeigt wird.

Dieser Fall ist in Abb. 5 auch im Ostwald-Dreieck vorgeführt.

In Punkt 1 ist die Verbrennung unvollkommen (CO vorhanden). Als Ergebnis der Messung zeigen sich  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$ .

Wäre die Verbrennung bei dem zu Punkt 1 gehörenden Luftverhältnis vollkommen gewesen ( $m_1$ ), so hätten dazu die Meßdaten  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  gehört (Punkt 1'). Würde zu  $\text{CO}_2$  ein größeres Luftverhältnis ( $m_2$ ) zugeordnet, so

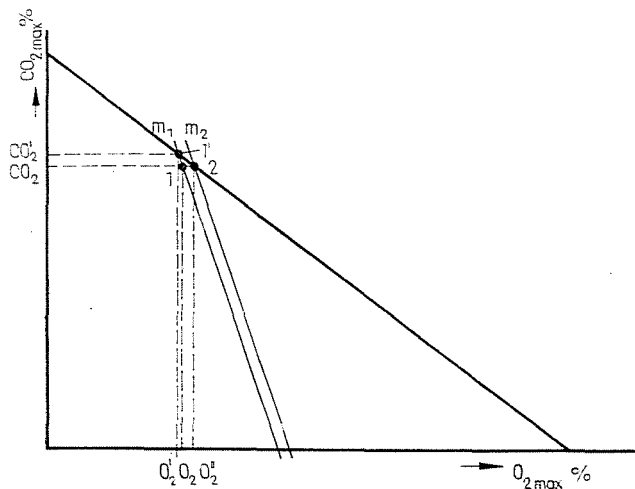


Abb. 5

könnte die Verbrennung wohl vollkommen sein (Punkt 2), doch würde dann schon die Sauerstoffmenge  $\text{O}_2''$  dazu gehören. Die Verhältnisse sind auch im Koordinatensystem  $\text{CO}_2 + \text{CO} - m$  gut wahrnehmbar (Abb. 4).

Aus der Abbildung  $\text{CO}_2 + \text{CO} - m$  geht auch hervor, daß das  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  mit der Zunahme des Luftverhältnisses immer mehr anwächst (bis zu 21%). Dies stimmt mit dem erläuterten Ostwald-Dreieck überein. Der Wert von  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  hängt stets von dem mit dem Feuerungsmechanismus erreichbaren minimalen Luftverhältnis  $m$  (vollkommene Verbrennung angenommen) ab. Dieses ändert sich je nach Feuerungsmechanismus und Brennstoff (bei Ölfuerung liegt es z. B. zwischen 16—17,5%).

Das Ostwald-Dreieck leistet auch zu der Einregelung bzw. der richtigen Inbetriebhaltung gute Hilfe. Im gegebenen Anfangszustand (Abb. 6) soll der Betriebspunkt im Inneren des Ostwald-Dreiecks in Punkt 1 liegen. Dies bedeutet eine unvollkommene Verbrennung, schlechte Feuerungseinstellung. In diesem Falle hat sich der der Breite der schraffierten Fläche entsprechende  $\text{O}_2\%$  Sauerstoff nicht mit dem Brennstoff vermengt. Das Luftverhältnis ist

$m_1$ . Als erster Versuch könnte vorgestellt werden, daß bei unverändertem Luftverhältnis am Feuerungsmechanismus weitere Eingriffe durchgeführt werden und so die Lage 1', d. h. der Zustand einer vollkommenen Verbrennung, erreicht wird. Dies ist jedoch selten der Fall. Selten ist auch der Fall, daß nach weiterem Eingriff der Zustand 1 erhalten bleibt. Zumeist entsteht ein neuer Zustand 1'', der noch immer eine unvollkommene Verbrennung bedeutet. Doch ist jetzt schon eine gewisse Besserung eingetreten, es hat sich nämlich nur noch der der Breite der doppelt schraffierten Fläche entsprechende  $O_2\%$  Sauerstoff nicht mit dem Brennstoff vermischt.

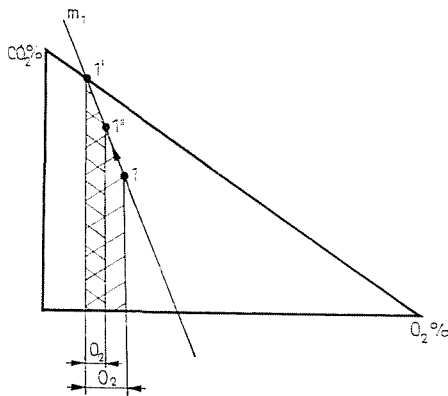


Abb. 6

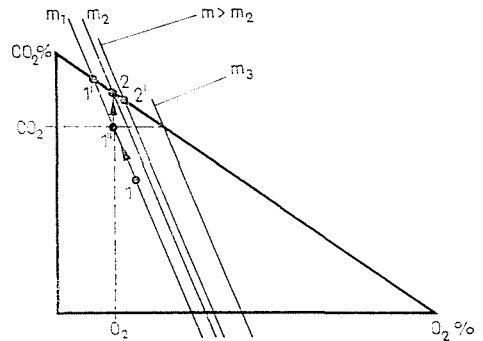


Abb. 7

Dieser Zustand 1'' soll nun in Abb. 7 veranschaulicht weiter geprüft werden. Das Luftverhältnis ist jetzt dem Zustand 2 entsprechend weiter bis zu  $m_2$  zu erhöhen. Damit ist es schon gelungen, die Hypotenuse zu erreichen, die den der vollkommenen Verbrennung entsprechenden Zustand angibt. Es ist zwecklos, das Luftverhältnis theoretisch bis auf  $m_3$  zu steigern, da dadurch der Feuerungsraum überflüssig abgekühlt würde, außerdem würde es eine Erhöhung des Rauchgasverlustes, die Verminderung des Luftzuges und die Zunahme der Neigung zur Tieftemperaturkorrosion bedeuten.

In der Praxis ist es dennoch zweckmäßig, auf den Betrieb mit  $m > m_2$  überzugehen (2'), u. zw. wegen des eventuellen Auftretens der Instabilität (z. B. Kaminzugschwankung bzw. Ungleichmäßigkeit der Luftzufuhr durch den Ventilator), die sich im Rückgang (Abnahme) der Luft bzw. des  $O_2$  bemerkbar macht, d. h. zum Entstehen von CO führen könnte. Die bisherigen Ausführungen gelten für den Zustand direkt hinter dem Feuerraum, also für die Stelle, wo die Verbrennung schon beendet ist, bzw. bei Feuerung mit Überdruck für den am Abgasstutzen des Kessels gemessenen Zustand.

Wie man es schon im vorhergehenden sehen konnte, ist es leicht möglich, daß durch die bei den »nachgekoppelten Heizoberflächen« hinter dem Feuer-



raum eindringende Falschlufft das Bild verzerrt wird, weshalb es zweckmäßig ist, an mehreren Punkten, jedoch vor allem hinter dem Feuerraum, Proben zu nehmen und eine Analyse zu machen.

**IV. Praktische Beispiele mit der Benutzung des Ostwald-Dreiecks**

Folgende Fälle sind in der Praxis zu unterscheiden:

1. Die Verbrennung ist vollkommen und in die Heizvorrichtung strömt keine Falschlufft ein. Als Beispiel dient ein Dreizug-Flammrohr-Rauchrohr Kesseltyp mit Ölheizung. Bei dieser Heizvorrichtung kommt keine Falschlufft-Einströmung vor, die Feuerung geht mit Überdruck.



Abb. 8

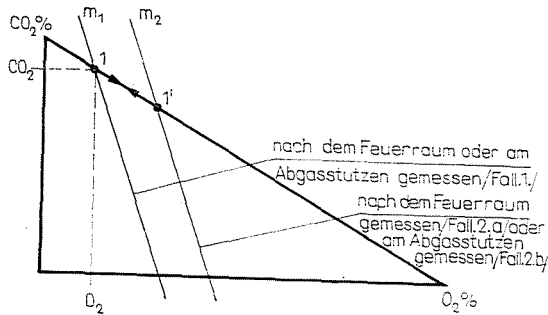


Abb. 9

Die symbolische Bezeichnung der Vorrichtung ist in Abb. 8 sichtbar. Die  $CO_2$ - und die  $O_2$ - bzw.  $CO$ -Werte hinter dem Feuerraum oder am Abgasstutzen gemessen, ergibt sich im Ostwald-Dreieck der Zustand 1. Der  $m_1$ -Wert des Luftverhältnisses hängt, eine fachgemäße Einstellung angenommen, bloß vom Feuerungsmechanismus ab. Die Verhältnisse sind in Abb. 9. veranschaulicht.

2. Die Verbrennung ist vollkommen, wobei entweder

a) das eingestellte Luftverhältnis zu groß ist. Bleiben wir beim Beispiel des Flammrohr-Rauchrohr-Kessels, wobei die Verhältnisse wieder im Ostwald-Dreieck (Abb. 9) dargestellt werden sollen. Um von Zustand 1' in den Zustand

1 zu gelangen, ist der Wert  $m_2$  auf  $m_1$  herabzusetzen,  $m_1$  entspricht dem Wert  $m_1$  im vorherigen Fall No. 1; oder

b) *Einströmung von Falschluf*t vorliegt. Als Beispiel soll ein Zweitrommel-Steilrohr-Kessel mit Ölheizung betrachtet werden. Die symbolische Bezeichnung der Vorrichtung ist in Abb. 10 veranschaulicht. Im Ostwald-Dreieck ist sichtbar, daß der dem hinter dem Feuerraum bestehenden Luftverhältnis  $m_1$  entsprechende Zustand 1 gemäß den am Abgasstutzen gemessenen Daten ( $\text{CO}_2$ ;  $\text{O}_2$ ) in den dem Luftverhältnis  $m_2$  entsprechenden Zustand 1' übergeht (Abb. 9).

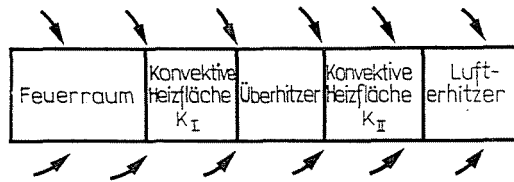


Abb. 10

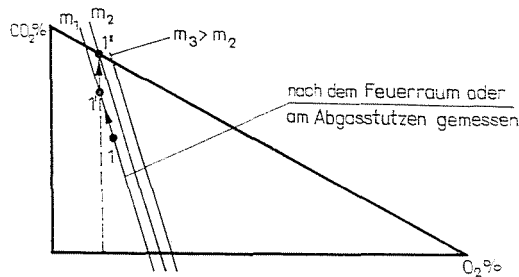


Abb. 11

3. *Die Verbrennung ist unvollkommen (schlechte Einstellung) und Falschluf*-*Einströmung liegt nicht vor*. Bleiben wir weiter beim Beispiel des Flammrohr-Rauchrohr-Kessels. Punkt 1 in Abb. 11 bezeichnet eine unvollkommene Verbrennung (schlechte Einstellung). Durch weitere Verstellung der Öltemperatur, des Zerstäubungsdruckes, der Flammenlänge und der Lage usw. kommt man von Punkt 1 in Punkt 1'. In einem gewissen Falle kann Punkt 1' auch auf der Hypotenuse liegen u. zw. beim Luftverhältnis  $m_1$ . Gemäß Abb. 11 bezeichnet der Zustand 1' noch eine unvollkommene Verbrennung. Das Luftverhältnis auf  $m_2$  gesteigert, gelangt man zu dem Zustand 1'', der bereits eine vollkommene Verbrennung bedeutet. Für die Sicherheit ist es jedoch wegen der Instabilität zweckmäßig, das Luftverhältnis  $m_3 > m_2$  einzustellen. Die Daten der Analyse können auch in diesem Falle ( $\text{CO}_2$ ;  $\text{O}_2$ , usw.) hinter den Feuerraum oder am Abgasstutzen bestimmt werden.

4. Die Verbrennung ist unvollkommen (schlechte Einstellung) und auch Falschluff-Einströmung ist vorhanden. Als Beispiel soll wieder der Zweitrommel-Steilrohr-Kesseltyp dienen. Gemäß Abb. 12 ergeben die Daten der Analyse hinter dem Feuerraum den Zustand 1. Die am Abgasstutzen gemessenen Daten ergeben entweder Punkt 1' oder Punkt 1'' (in letzterem Falle besteht beträchtliche Falschluffzufuhr). Es ist also zu ersehen, daß bei einem CO-Gehalt von 1—2% im Feuerraum, laut den am Abgasstutzen gemessenen Daten, eine scheinbar vollkommene Verbrennung besteht. Da treten an einigen

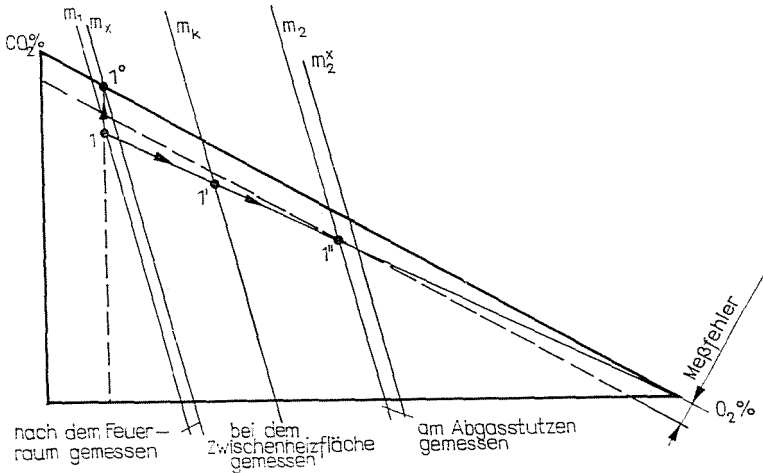


Abb. 12

Oberflächen Rußablagerungen auf und neben der Verringerung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades sinkt auch der Wirkungsgrad der Heizoberflächen infolge des durch die Rußablagerungen verursachten Anstieges der Rauchgastemperatur (Abb. 13). Diese haben gemeinsam die Verringerung des Kesselwirkungsgrades bzw. den Mehrverbrauch von Brennstoff zur Folge. In solchen Fällen ist es deshalb unerlässlich, auch hinter dem Feuerraum das CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, bzw. CO zu messen. Die Einstellung der Feuerung muß also auf Grund der direkt hinter dem Feuerraum vorgenommenen Analyse erfolgen.

Gemäß der Abbildung bedeutet Punkt 1° die richtige Einstellung für den Feuerraum (m<sub>x</sub>). Die Einströmung von Falschluff hat jetzt am Kesselende anstatt des Luftverhältnisses m<sub>2</sub> das Luftverhältnis m<sub>2x</sub> zur Folge.

Bei unvollkommener Verbrennung kann das CO aus den Meßdaten von CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> mit folgendem Ausdruck ermittelt werden:

$$CO = \frac{(CO_2 + O_2) \text{ theor.} - (CO_2 + O_2) \text{ gemess.}}{\frac{21}{CO_{2 \max}} - 0,395}$$

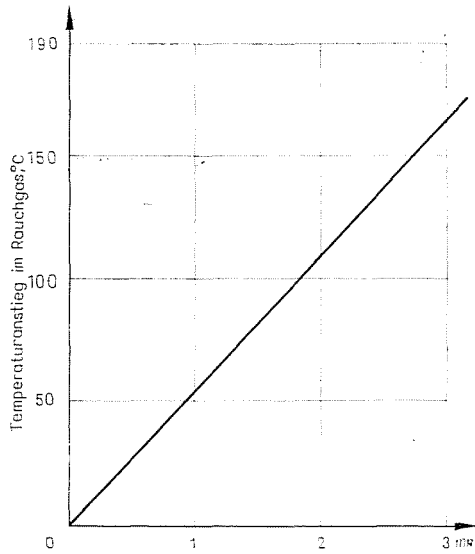


Abb. 13

## V. Die Modifizierung des Ostwald-Dreiecks mit der Berücksichtigung des Rußgehaltes

### 1. Beachtung des Rußgehaltes bei der Abgasanalyse

Bei einer unvollkommenen Verbrennung muß nicht nur mit unverbrannten Gasen (hauptsächlich  $\text{CO}$ , doch ist auch  $\text{H}_2$  möglich), sondern auch mit Rußbildung gerechnet werden. Das Ostwald-Dreieck ist bei einem Rußgehalt von geringer Menge noch gültig. Im Falle eines größeren Rußgehaltes ist es zweckmäßig, den Ausdruck  $\text{CO}_{2\text{max}}$  zu prüfen.

$$\text{CO}_{2\text{max}} \frac{1,853 \cdot c}{V'_{0s2}} \cdot /$$

wo:

$c$  — Kohlenmenge kp/kp

$V'_{0s2}$  — spezifische trockene Abgasmenge  $\text{Nm}^3/\text{kp}$  bedeuten.

Bei der Rußbildung nimmt der Ausdruck folgende Form an:

$$\text{CO}_{2\text{max}}^k = \frac{1,853(c - c_k)}{1,853(c - c_k) + 0,683 \cdot s + 0,8 n + 0,79 \cdot L'_0}$$

$c_k$  — Rußmenge kp/kp

$s$  — Schwefelgehalt kp/kp

$n$  — Stickstoffgehalt kp/kp

$L'_0$  — theoretische spezifische Luftmenge  $\text{Nm}^3/\text{kp}$  bedeuten.

Bezüglich der Rußentstehung müssen prinzipiell zwei Fälle unterschieden werden:

a) Ruß entsteht überhaupt nicht oder nur in einer vernachlässigbaren Menge.

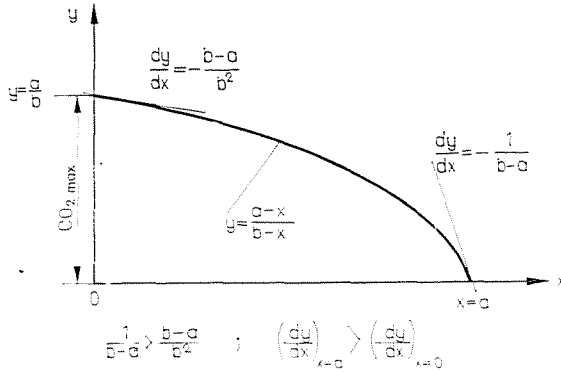


Abb. 14

b) Aus allem zur Verfügung stehenden Kohlenstoff entsteht Ruß (dies ist nur eine theoretische Annahme). Den obigen Ausdruck von  $\text{CO}_2^k_{\text{max}}$  in einfacherer Form aufgeschrieben, ist

$$y = \frac{a - x}{b - x}$$

dabei bedeuten:

$$y = \text{CO}_2^k_{\text{max}}$$

$$x = 1,853 \cdot c_k$$

$$a = 1,853 \cdot c$$

$$b = 1,853 \cdot c + 0,683 \cdot s + 0,8 \cdot n + 0,79 \cdot L'_0$$

Die Prüfung der Funktion durchgeführt, müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

$$0 \leq x \leq a$$

$$a < b$$

Für die Steilheit der Funktionskurve gilt:

$$y' = \frac{dy}{dx} = - \frac{b - a}{(b - x)^2}$$

Die Funktionskurve kann wie folgt aufgezeichnet werden (Abb. 14):

an der Stelle  $x = 0$  ist

$$y = \frac{a}{b} = \text{CO}_{2\text{max}} = \frac{1,853 \cdot c}{V'_{0\text{sz}}}$$

und

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{b - a}{b^2}$$

an der Stelle  $x = a$  ist  $y = 0$  und

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{1}{b - a}$$

In Kenntnis der Funktion  $y = f(x)$  läßt sich bei gegebener und bekannter, also meßbarer Rußmenge (kp/kp) der Wert von  $\text{CO}_{2\text{max}}^k$  ermitteln.

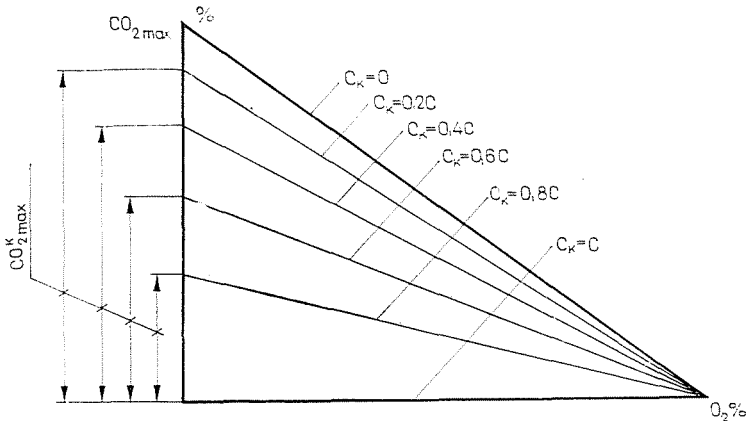


Abb. 15

Bei Rußbildung wird also der auf dem genauen Wege ermittelte Luftüberschußfaktor kleiner sein als jener, der bisher mit dem Ausdruck

$m = \frac{\text{CO}_{2\text{max}}}{\text{CO}_{2\text{gemessen}}}$  auf die übliche Weise ermittelt wurde. Somit muß in dem ursprünglich benützten Ostwald-Dreieck anstatt  $\text{CO}_2$  der Wert  $\text{CO}_{2\text{max}}^k < < \text{CO}_{2\text{max}}$  auf die senkrechte Achse aufgemessen werden.

Würde aus der gesamten im Öl befindlichen Kohlenmenge Ruß entstehen, so würde das mit dem ursprünglichen  $\text{CO}_{2\text{max}}$  Wert konstruierte Ostwald-Dreieck zu einer Geraden ( $\text{O}_2$  Achse) zusammenschrumpfen (Abb. 15). Dies trifft in der Wirklichkeit natürlich nicht ein. Bei Ölf Feuerungsanlagen wird bei der Durchführung einer instrumentalen Analyse das Ausmaß der relativen Verrußung bestimmt. Bei einem der am meisten angewandten Verfahren gibt die Bacharach-Zahl die relative Rußmenge im Abgas an. Beim neuen, modi-

fizierten Ostwald-Dreieck muß aus der Bacharach-Zahl die absolute Rußmenge ermittelt werden. In deren Kenntnis können mit Hilfe voriger Kurve (Abb. 14) auch bei praktisch vorkommende Rußmengen die Werte von  $\text{CO}_{2\text{max}}^k$  ermittelt werden. In das modifizierte Ostwald-Dreieck können also bei den einzelnen Rußmengen auch die entsprechenden Bacharach-Zahlen eingetragen werden (Abb. 16). In einem geeigneten Maßstab läßt sich also auch direkt die Bacharach-Zahl im Dreieck darstellen.

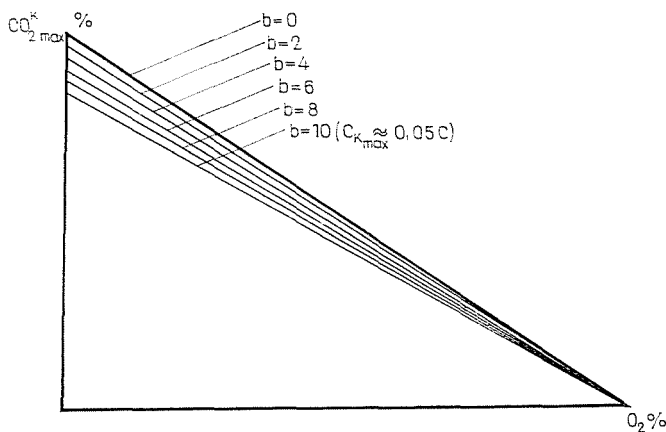


Abb. 16

Die so entstandenen neuen Hypotenusen geben die geometrischen Orte jener Punkte an, in denen das Ausmaß der Rußbildung gegeben und konstant ist, aber kein CO entstand. Innerhalb der Fläche eines solchen modifizierten Ostwald-Dreiecks gilt für jeden Punkt auch weiterhin, daß dort auch CO entsteht.

CO kann ohne eine bedeutendere Rußmenge, oder auch damit entstehen.

Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, daß Ruß praktisch ohne CO, oder mit diesem zusammen anfällt; das hängt von der Art des Brennstoffes sowie von den Umständen des Verbrennungsvorganges ab.

## 2. Bestimmung der absoluten Rußmenge

Bei Ölfeuerungsanlagen ist es im allgemeinen nicht leicht, die Menge des entstehenden Russes zu bestimmen. Zwischen der Bacharach-Zahl und der absoluten Rußmenge besteht folgender approximativer, halbempirischer Zusammenhang (nach CZINKÓCZKY):

$$c'_k = \frac{0,1 \cdot b \cdot 10^3}{s} \text{ mg/Nm}^3$$

wo:

$c'_k$  — Rußmenge im feuchten Abgas mg/Nm<sup>3</sup>

$b$  — Bacharach-Zahl

$s$  — Zylinder-Rauminhalt des Probennehmers (beim Gerät System Bosch 0,318) dm<sup>3</sup>

bedeuten.

Im Falle  $b = 5 \rightarrow c'_k = 0,00157$  mg/Nm<sup>3</sup>

im Falle  $b = 10 \rightarrow c'_k = 0,00314$  mg/Nm<sup>3</sup>

bei  $m = 1,2 \rightarrow V'_{fg} = 14,0$  Nm<sup>3</sup>/kp

Damit ist  $c_k = c'_k \cdot V'_{fg}$  kp Ruß/kp Öl

$c_k = 0,022$  kp/kp ( $b = 5$ )

$c_k = 0,044$  kp/kp ( $b = 10$ )

Der Kohlengehalt der zur Feuerung verwendeten Ölsorten beträgt also 0,8...0,85 kp/kp Öl.

Die entstehende Rußmenge erreicht maximal etwa 5% dieses Kohlengehaltes.

Bei  $b = 5$  sinkt der Wert des  $CO_{2,max}$  um ungefähr 0,5%, bei  $b = 10$  um 1%, bloß wegen der Rußbildung. Da ist es jedoch schon sinnvoll, das neue, modifizierte Dreieck bei der Auswertung der Analyse-Daten zu verwenden. Außer  $CO_2$ ,  $O_2$  und  $CO$  ist also auch die Rußmenge zu messen (laut BACHARACH). In dem in entsprechendem Maßstab aufgezeichneten Ostwald-Dreieck muß der jeweilige  $CO$ -freie Zustand dem Ausmaß der Rußbildung entsprechend auf den Hypotenusen liegen. Ist auch  $CO$  vorhanden, so befindet sich

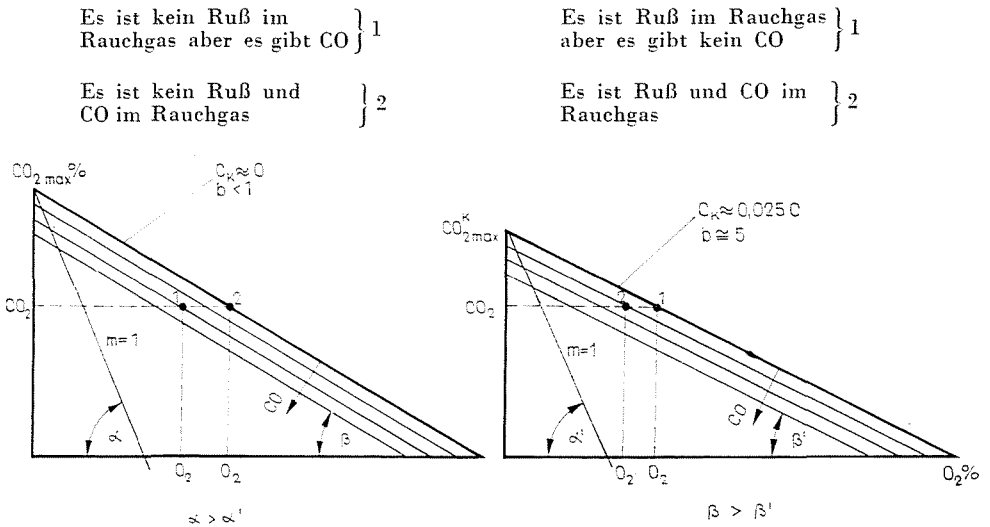


Abb. 17



der den Zustand anzeigende Punkt unter der Hypotenuse (im entsprechenden Dreieck), im Inneren des Dreiecks. Es ist zweckmäßig, die neuen Hypotenusen bei den ganzen Bacharach-Zahlen anzugeben, bei den entsprechenden Rußgehalten.

Es empfiehlt sich, die neuen modifizierten Dreiecke gesondert zu zeichnen (zu konstruieren), da sich der Neigungswinkel der den Luftüberschußfaktor  $m$  und die konstanten CO-Werte anzeigenden Geraden (im Verhältnis zum ursprünglichen rußfreien Ostwald-Dreieck) verändert (Abb. 17). Zu einem gegebenen Rußgehalt muß also ein gegebenes Dreieck konstruiert werden, auch bei gleicher Ölsorte.

Die so bestimmten Luftüberschußfaktoren sind kleiner, als die sich ergebenden Werte, wenn die Rußbildung außer acht gelassen wird, und diese Tatsache gewährleistet auch die richtige Bestimmung der Enthalpien für den Gebrauch des  $i - t$  Diagramms.

Mit Hilfe des modifizierten Ostwald-Dreiecks läßt sich auch hinsichtlich des Verbrennungsprozesses aus den Daten der Abgasanalyse ein eindeutigeres Bild gewinnen.

### Zusammenfassung

Bei der Einregulierung der Feuerungsanlagen und der Kontrolle ihres Betriebes können die Verhältnisse mit dem wohlbekannten Ostwald-Dreieck nachgebildet werden. Der Aufsatz untersucht für die Praxis wichtige Fälle unter Anwendung des Ostwald-Dreiecks.

Bei einer unvollkommenen Verbrennung muß nicht nur mit unverbrannten Gasen (hauptsächlich CO, doch ist auch  $H_2$  möglich), sondern auch mit Rußbildung gerechnet werden.

Bei Ölfeuerungsanlagen wird bei Durchführung einer instrumentalen Analyse das Ausmaß der relativen Verrußung bestimmt. Im neuen, modifizierten Ostwald-Dreieck können also auch bei den einzelnen Rußmengen die ihnen entsprechenden Bacharach-Zahlen eingetragen werden. Die so entstandenen neuen Hypotenusen geben die geometrischen Orte jener Punkte an, bei welchen das Ausmaß der Rußbildung gegeben und konstant ist, jedoch kein CO entstand. Innerhalb der Fläche eines solchen modifizierten Ostwald-Dreiecks gilt für jeden Punkt auch weiterhin, daß dort auch CO entsteht.

### Literatur

1. GEISLER, W. K.: Wärmetheorie, Wärmetechnik, Wärmewirtschaft. Fachv. Schiele und Schön. Berlin, 1958.
2. GUMZ, W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik. Springer-Verlag. Berlin -Göttingen- Heidelberg, 1962.
3. ZINZEN, A.: Dampfkessel und Feuerungen. Springer-Verlag. Berlin -Göttingen- Heidelberg, 1957.

Endre Kiss, Budapest XI., Stoczek u. 2-4., Ungarn