

# DIE QUALITATIVE UNTERSUCHUNG DES BEI EINER GEGEBENEN VERBRENNUNGSEINRICHTUNG WÄHREND DES VERBRENNUNGSPROZESSES VON FLÜSSIGEN KOHLENWASSERSTOFFEN VERLAUFENDEN KARBONAUSSCHEIDUNGSVORGANGS

I. KISS-HUNYADI

Institut für Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Aero- und Thermotechnik,  
Technische Universität, H-1521 Budapest  
Eingegangen am 6. Februar 1984  
Vorgelegt von Prof. Dr. E. Pásztor

## Summary

Oilburners operating with evaporation are very sensitive of carbon deposition. This paper deals with the generation mechanism of oil-black and oil-coke which appear in the course of the combustion process and the possibilities of avoiding the black deposition, respectively.

One can state in general that in case of oilburners operating with evaporation a fraction of combustion oxygen should be inlet directly over the evaporation surface, so the evaporated oil can be mixed with the air (and be oxidized) before the thermal decomposition in a temperature domain near to the ebullition temperature. The rest fraction of air inlet should be chosen with regard to the spatial distribution of the evaporation intensity and to the flow direction of the decomposition and combustible oxidation products in the combustion chamber.

## Problemstellung

Die Zunahme der Kohlenwasserstoffpreise verlangt, daß in den Einrichtungen, in denen derartige Energieträger verbrannt werden, die Wärme-freisetzung mit kleinstem Verbrennungsverlust erfolge. In Haushalt, Industrie, Landwirtschaft und Bergbau sind Ölbrenner auf Verdampfungsbasis verbreitet. Für die Konstruktion dieser Einrichtungen ist kennzeichnend, daß das Öl in das sog. Brenngefäß einströmt, auf dessen Boden einen dünnen Film bildet der infolge der Rückstrahlung des Verbrennungsraumes verdampft. Die nach oben steigenden Öldämpfe treffen sich mit der Luft, die durch Bohrungen an der zylindrischen Wand des Verbrennungsraums hereinströmt und verbrennen.

Die die Flüssigkeitsoberfläche verlassenden Dämpfe verhalten sich schon als brennbare Gase. Die Untersuchung ihres Verbrennungsvorganges wird aber dadurch erschwert, daß die bei Luftmangel erhitzten Kohlenwasserstoff-komponenten des Öles teilweise verdampfen, teilweise jedoch sich thermisch zersetzen wobei fester Kohlenstoff entsteht. Aus den durch Verdampfen freige-setzten flüchtigen Komponenten kann infolge von reaktionskinetischen Gleich-gewichtsstörungen ebenfalls Karbon ausscheiden.

Die Verbrennung der flüchtigen Kohlenwasserstoffe ist eine sog. homogene Reaktion, die Vermischung und die Verbrennung der Gase kann in jedem Raumpunkt erfolgen. Das Verbrennen des festen Kohlens ist jedoch eine sog. heterogene Reaktion, die nur an der Phasengrenze des festen und gasförmigen Zustands, d. h. an der Oberfläche des festen Körpers erfolgen kann. Das unverbrannte feste Kohlenstoff bedeutet einerseits einen Verbrennungsverluste, andererseits kann seine Ablagerung Betriebsprobleme hervorrufen.

### Verbrennung und thermische Zersetzung von flüssigen Kohlenwasserstoffen

Die Kohlenstoffausscheidung beim Verbrennen der flüssigen Brennstoffe wird durch eine Reihe von Nebenerscheinungen begleitet. Die Kohlenwasserstoffe der flüssigen Brennstoffe sind thermisch instabil, weshalb sie bei Erhitzung bei Luftmangel nur verdampfen sondern auch Zersetzung erleiden. Ist aber genügend Sauerstoff zugegen, so werden die Kohlenwasserstoffe im Dampfzustand unter Bildung von verbrennbaren Gasen oxydiert. Beim Verbrennungsprozess der flüssigen Kohlenwasserstoffe werden im allgemeinen die folgenden Phasen unterschiedet:

- Erhitzen und Verdampfen des Brennstoffes,
- thermische Zersetzung und Oxydation,
- Bildung eines brennbaren Gemisches,
- Entzündung und Verbrennung entsprechend den Eigenschaften der Gasphase.

Natürlich können diese Abschnitte voneinander nicht scharf unterschiedet werden, da sich diese einander zeitlich und räumlich überlappen.

Der Brennverlauf hängt auch davon ab, wie der Brennstoff zur Verbrennung vorbereitet wird.

Bei Ölbrennern auf Verdampfungsbasis verdampfen die Ölgase von der Oberfläche der sich in Ruhe befindlichen Flüssigkeit, wonach durch die Flammentemperatur sie entzündet werden. Nicht die gesamte Kohlenstoffmenge verdampft jedoch. Im Grunde genommen spielt sich nämlich ein der Erdöldestillation und dem Kracken ähnlicher Vorgang ab. Zuerst entweichen die leichteren Kohlenwasserstoffe dann zersetzen sich die größeren Moleküle die auch abdestillieren bis Kohlenwasserstoffe mit einem geringen Wasserstoffgehalt zurückbleiben die praktisch für festen Kohlenstoff betrachtbar sind.

Der Charakter der sich bei Luftmangel vollziehenden thermischen Zersetzung hängt von den Eigenschaften der Kohlenwasserstoffkomponenten, der Temperatur und der Erhitzungsdauer ab. Die thermische Zersetzung der Kohlenwasserstoffe ist ein sehr komplizierter Vorgang, der aus einer Reihe von Reaktionen resultiert, wobei in großer Menge Zwischenprodukte entstehen.

Diese Reaktionen können folgendermaßen klassifiziert werden:

- a) Spaltung von C-C-Verbindungen, wobei Moleküle von niedrigerer Kohlenstoffzahl entstehen (eigentlich Verkrackung).
- b) Spaltung der C-H-Verbindungen, Dehydrogenisation.
- c) Isomerisation, strukturelle Umwandlung innerhalb der Moleküle.
- d) Polymerisation und Kondensation wodurch aus den Primärprodukten der Zersetzung größere Moleküle entstehen.

Die das Öl bildenden einzelnen Kohlenwasserstoffverbindungen verhalten sich bei thermischer Einwirkung verschiedenartig. Thermisch am stabilsten sind die Aromaten, danach die Olefinen und Paraffinen. Die bei luftarmer Erhitzung der flüssigen Brennstoffe entstehenden leichten Kohlenwasserstoffe von niedriger Kohlenstoffzahl sind leicht anzündbar. Die Kohlenwasserstoffe von hohem Molekulargewicht der aus den aromatischen Verbindungen entstehende Koks und der während der Dehydrogenisation entstehende Ruß-Kohlenstoff sind aber schwerer anzündbar, weshalb diese den Verbrennungsraum entweder unverbrannt verlassen oder in Form einer Ablagerung in Erscheinung treten.

Beim Vorhandensein von genügend Sauerstoff werden sich die verdampften, gasartigen Kohlenwasserstoffe zu brennbaren Gasen oxydiert, die wieder leicht anzündbar sind (z. B. CO). Wenn Erhitzung, Erwärmung und Verdampfung schnell und unter gleichzeitiger Oxydation verlaufen, so sind die Bedingungen zur vollkommenen Verbrennung geeignet. Bei einer langsamen Verdampfung, wenn keine Möglichkeit zur gleichzeitigen Oxydation vorhanden ist, so entstehen aus den Zersetzungsprodukten schwer anzündbare, feste Teilchen.

Um einerseits die entsprechenden Verbrennungsumstände sichern und andererseits die Verbrennungsverluste reduzieren zu können, ist es empfehlenswert den Entstehungsmechanismus der sich während der Verbrennung in zwei Formen — Koks und Ruß — ausscheidenden festen Karbons getrennt zu untersuchen.

### **Der Koks-Entstehungsmechanismus während des Verbrennungsvorganges von flüssigen Kohlenwasserstoffen**

Koks ist das während des Verlaufes der thermischen Zersetzung beim Verdampfen von flüssigen Kohlenwasserstoffen nach Entweichen der flüchtigen Komponenten zurückbleibende feste Destillationsprodukt, das nicht rußt.

An der Verkokung nehmen die kondensierten aromatischen Kohlenwasserstoffe teil. Der Verkokungsprozess kann mit Hilfe der Dehydrogenisation und der Polymerisation erklärt werden. Während der Polymerisation entstehen Riesenmoleküle, die sich im Öl befindlichen aromatischen Kohlen-

wasserstoffe verwandeln sich in Pech und Koks. Im Verlaufe des Verbrennungsprozesses ändern sich die Kohlenwasserstoffe strukturell, aber es vollzieht sich keine Oxydation. Die Menge des sich aus den flüssigen Kohlenwasserstoffen entstandenen Kokes hängt davon ab, in welcher Bindung der Kohlenstoff vorhanden ist. Anders spalten sich die aliphatischen (Paraffin) Kohlenwasserstoffe und anders die ringartigen aromatischen Verbindungen.

Die C—H-Bindung der aliphatischen Kohlenwasserstoffe ist stabiler als die C—C-Bindung. Wenn die Spaltung bei einer C—C-Bindung auf tritt; dann ändert sich praktisch das C/H Verhältnis in dem entstandenen Produkt im Vergleich zu dem ursprünglichen nicht. Daraus folgt, daß bei der Zersetzung der aliphatischen Kohlenwasserstoffe (Paraffine) für die Verkrackung bessere Bedingungen vorliegen als für die Dehydrogenisation.

Bei den aromatischen Kohlenwasserstoffen ist die C—H-Bindung weniger stabil, und an den Stellen der freien Wasserstoff (atome) schließt sich ein neuer Ring an. Der Innenring wird aus vielen Kohlenstoffatomen gebildet, Wasserstoffatome befinden sich nur am Rande, das C/H Verhältnis nimmt zu. Die Untersuchung der Koksreste weist auch in jedem Fall auf eine überwiegende Ringstruktur hin, die nach den obigen Ausführungen verständlich ist. Ähnlicherweise ergibt sich eine Erklärung dafür, warum bei den sonst unter den gleichen Bedingungen verbrannten verschiedenen Ölsorten die Koksbildung anders verläuft.

Um die Neigung der einzelnen Ölsorten zur Koksbildung ermitteln zu können, wird die sog. Conradson-Prüfung durchgeführt. Der Verkockungsvorgang wird stark durch die mit der Ölqualität zusammenhängenden Faktoren beeinflusst. Die Koksbildung wird durch den Schwefelstoff- und den Wana-diumgehalt der Öle katalysiert. Die Neigung zur Verkockung hängt auch von dem Maß der Ölraffinierung ab. Die durch Destillation gewonnenen Brennöle beinhalten keine großmolekulare asphaltartige Komponenten. Die durch Kracken gewonnenen Heizöle enthalten aber ungesättigte Kohlenwasserstoffe, die eine Neigung zur Aromatisierung besitzen, die zu einer starken Koksbildung führen kann.

### **Der Rußbildungsvorgang beim Verbrennen von flüssigen Kohlenwasserstoffen**

Der Ölruß entsteht in molekularer Größenordnung als Produkt reaktionskinetischer Gleichgewichtsstörungen aus den während der Verkockung bzw. Verdampfung *freiwerdenden verkrackten flüchtigen Komponenten der Gasphase*.

Zu einer Rußausscheidung aus der Gasphase führt die reversible Boudard-Reaktion oder die Wassergasreaktion.

Bei starker Abkühlung verlaufen nämlich die Reaktionen in Richtung der Kohlenstoffausscheidung.

Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen ist der Anteil dieser Reaktionen an der Rußbildung in der Flamme nicht allzu hoch. Von entscheidender Menge ist aber der am Anfang der Brennzonen während der thermischen Zersetzung von Kohlenwasserstoffen entstehende Ruß, z. B. die Spaltung des Methans:



In der Verbrennungszone der Diffusionsflamme von Kohlenwasserstoffen bzw. in der Umgebung des brennenden Tropfens wird ein großer Anteil der gasartigen Kohlenwasserstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur und der Aufenthaltsdauer thermisch zu Ruß und Wasserstoff verkrackt.

Mit Zunahme der Temperatur und der Aufenthaltsdauer wird der Verkrackungsvorgang beschleunigt. Die Temperatur übt auf den Krackvorgang einen wesentlich größeren Einfluß als die Aufenthaltsdauer aus.

Die Temperaturzunahme beeinflusst auch die Verbrennungsgeschwindigkeit. Sowohl die Verbrennungs- als auch die Krackgeschwindigkeit nimmt mit Zunahme der Temperatur zu, und da sie nicht den gleichen Verlauf haben, müssen diese Geschwindigkeiten irgendwann den gleichen Betrag erreichen.

Die Abb. 1 zeigt die Verbrennungs- und die Krackreaktions-Geschwindigkeit des Gasöles in Abhängigkeit von der Temperatur. Solange die Kurve der Verbrennungsreaktion oberhalb der der Krackreaktion verläuft, hat die Verbrennungsgeschwindigkeit einen größeren Wert. Die Krackgeschwindigkeit steigt stärker, und an dem Punkt, wo ihre Kurve die der Verbrennungsgeschwindigkeit schneidet, wird der Verbrennungsvorgang im Vergleich zu dem des Krackens langsamer. Oberhalb dieses Temperaturbereiches können

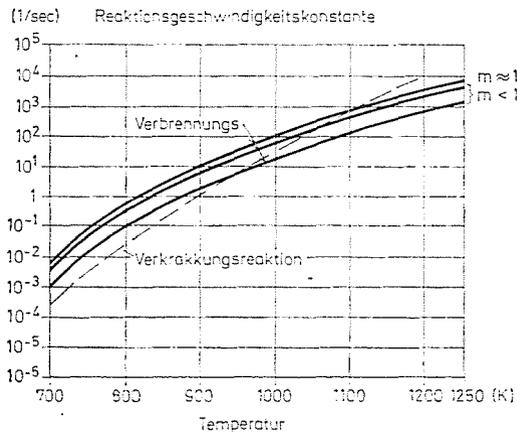


Abb. 1. Verbrennungs- und Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten von Gasöl

wir während der Verbrennung sogar beim Vorhandensein von Sauerstoff mit der intensiven Spaltung von Kohlenwasserstoffen und mit der Rußbildung rechnen.

Die Möglichkeit zur Vermeidung der Rußbildung besteht darin, daß die gasförmigen Kohlenwasserstoffe noch bei niedrigen Temperaturen — 800—900 K — mit der Luft in Berührung gebracht werden. Wenn der Verdampfungsvorgang der flüssigen Kohlenwasserstoffe schnell und mit gleichzeitiger Oxydation verläuft, dann sind die Möglichkeiten der vollkommenen Verbrennung gegeben.

Dazu ist aber notwendig, daß eine genügend schnelle Gemischbildung gesichert wird, und sich die Oxydation der Kohlenwasserstoffe schon vor der Einstellung der höheren Temperatur einsetzt.

Eine Oxydation der Kohlenwasserstoffe vor der Entzündung ist vorteilhaft, da während deren Verlaufes solche instabile Zwischenprodukte entstehen, die unter Einfluß thermischer Einwirkung in leicht anzündbare chemische Verbindungen zerfallen. Ist kein Sauerstoff in der Verbindung in genügender Menge vorhanden, oder ist seine Verteilung ungleichmäßig, so entstehen während der thermischen Zersetzung der Kohlenwasserstoffe schwere Kohlenwasserstoffe und Rußteilchen, deren Verbrennung schwerer gesichert werden kann.

Dies bedeutet besonders bei den Gasdiffusionsflammen ein Problem, wo die Luft-Gas-Vermischung teilweise oder vollkommen im Verbrennungsraum erfolgt, wodurch ein örtlicher Luftmangel leicht entstehen kann. Eine weitere Bedingung zur Vermeidung der Rußbildung besteht darin, daß der Verbrennung ein Verbrennungsraum genügenden Volumens zur Verfügung stehe und die Endtemperatur der Verbrennung genügend hoch sein soll, um die während der thermischen Spaltung entstandenen primären Rußteilchen verbrennen zu können. Die Rußbildung innerhalb der Flamme ist nämlich erst dann schädlich, wenn der entstandene Ruß nicht verbrannt wird und im Verbrennungsraum eine Ablagerung hervorruft oder die Flamme unverbrannt verläßt.

#### **Die Möglichkeiten zur Beseitigung der Rußbildung im Falle eines Ölbrenners gegebenen Systems auf Verdampfungsbasis**

In dem untersuchten Ölbrenner auf Verdampfungsbasis wird bei Nennbelastung eine auf die Zeiteinheit bezogene Wärmeenergie von 100 kW freigesetzt. Der Ölbrenner dient in einem zu Heizzwecken dienenden Thermoventilator als Wärmeentwicklungseinheit. Ein Teil der vom Ventilator angesaugten Luft deckt den Luftbedarf des Ölbrenners, ihr überwiegender Anteil wird durch die Rauchgase erwärmt zu technologischen und mit der Heizung zusam-

menhängenden Zwecken verwendet. Somit hat der Ölbrenner auf Verdampfungsbasis eine Zwangsluftversorgung, eine getrennte Regelung der zur Verbrennung geführten Luftmenge ist aber nicht möglich.

Die Abb. 2 zeigt die Skizze des Verbrennungsraumes. Dieser entspricht einem sog. Gefäßbrenner mit ovaler Grundfläche. Das durch das Öleinlaßrohr einströmende Öl fließt auf eine sog. Verdampfungsplatte, wo seine Verdampfung erfolgt bzw. bei einer höheren Belastung ein Teil des Öles auf den Grund des Verdampfungsraumes fließt, wo dann die Verdampfung vor sich geht. Die entscheidende, der Primärteil der zur Verbrennung benötigten Luftmenge gelangt in den Verdampfungsraum durch die an den seitlichen Zylindern des Brenners zweireihig ausgebildeten Bohrungen. In Form von Sekundärluft strömt der geringere Luftanteil durch die an der Deckplatte des Verdampfers ausgebildeten Bohrungen zu der sich schon ausgebildeten Flamme.

Oberhalb des Verdampfungsraumes befindet sich eine als ein Gußstück ausgebildete Flammenlenkwand, die einerseits die Flammenform beeinflusst und andererseits ihre Hitzfläche die Rückstrahlung in Richtung der Verdampfungsfläche verstärkt. Beim Betreiben der Einrichtung ließ sich im Verbren-

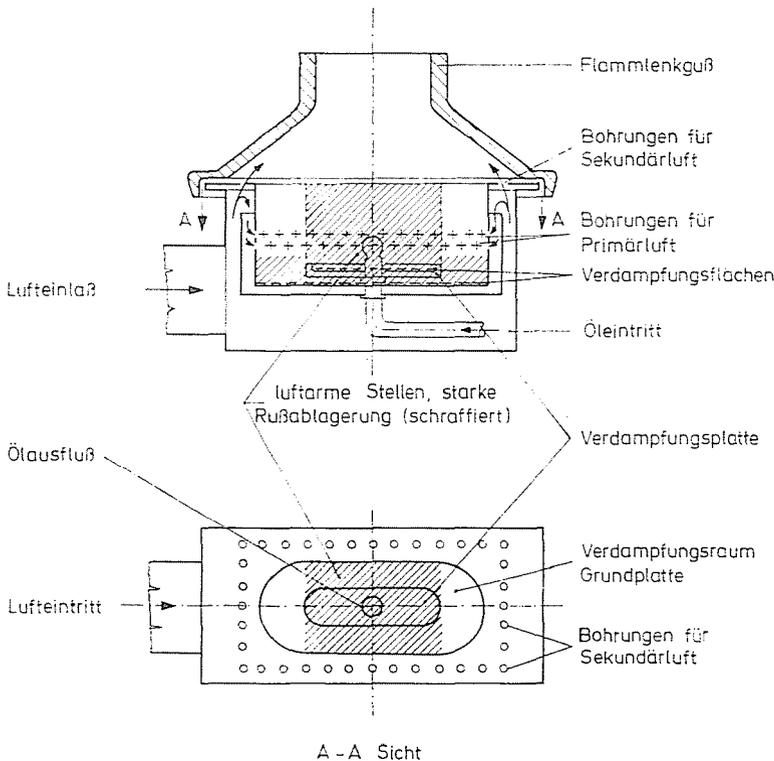


Abb. 2. Rußablagerungsstellen im Verbrennungsraum

nungsraum oberhalb einer Belastung von 80% eine äußerst starke Ablagerung bemerkbar machen, wodurch nach einer 8-stündigen Betriebszeit der weitere Betrieb gehemmt wurde, da der sich auf den Seitenwänden des Verbrennungsraumes ablagernde feste Stoff die Lufteinführungsöffnungen stufenweise verstopft hatte. Die Versuche bezweckten das Erforschen und die Beseitigung der Ursachen der Karbonbildung.

Bei den Ölbrennern auf Verdampfungsbasis wird die Kohlenstoffablagerung im allgemeinen durch gleichzeitig oder getrennt erfolgendes Auftreten von drei Faktoren hervorgerufen:

- Qualität des im Verbrennungsraum verbrannten Öles;
- Betriebsbedingungen;
- Brennerkonstruktion.

In Ölbrennern auf Verdampfungsbasis dürfen nur solche Ölsorten verwendet werden, die eine geringe Neigung zur Koksbildung besitzen und restlos verdampft werden können. Die Conradson-Zahl des verbrannten Öles betrug 0,01, so bestand nur ein unbedeutender Teil des entstandenen festen Karbons aus Ölkoks, sein überwiegender Anteil bestand aus dem in der Gasphase ausgeschiedenen Ölruß.

Das Maß der Rußbildung wurde entscheidend durch die Betriebsbedingungen beeinflusst. In einem offenen System bildet sich während der Verbrennung vom flüssigen Brennstoff eine Diffusionsflamme aus. Die aus der Flüssigkeitsphase in den Dampfzustand übergehenden Brennstoffteilchen diffundieren in die Raumteile des Verbrennungsraumes die reich an Sauerstoff sind. Gleichzeitig erfolgt eine Diffusion des Luftsauerstoffes in Richtung der Brennstoffoberfläche. In einem bestimmten Abstand von der Oberfläche bildet sich die Diffusionsflamme aus. Ein Teil der infolge der Verbrennung entstandenen Wärmemenge wird zur Verdampfung des Brennstoffes verbraucht. Die auf dieser Weise entstandenen Dämpfe strömen zwischen der Oberfläche und dem Flammenfront durch Zonen von ständig zunehmender Temperatur, wobei sie an Reaktionen mit endothermen Charakter teilnehmen. Infolge der Dehydrogenisation, der Verkrakkung und der unvollkommenen Mischung mit dem Sauerstoff entstehen primäre Rußteilchen. Wenn diese primären Rußteilchen genügend lang einer entsprechend hohen Temperatur ausgesetzt sind, und die Sauerstoffkonzentration dieser Zone genügend groß ist, so werden diese Teilchen verbrannt. Wird eine der genannten Bedingungen nicht erfüllt, so werden die unverbrannten Rußteilchen mit den Rauchgasen fortgerissen oder sie lagern sich an den Wänden der Verbrennungseinrichtung ab.

Die bei dem untersuchten Brenner — und im allgemeinen bei den Topfbrennern auf Verdampfungsbasis — entstehenden Flammen erreichen einen Zustand zwischen laminar-diffusen und vorgemischten Flammen, doch näher zu den Diffusionsflammen da die Diffusionsvorgänge durch die turbulenzher-vorrufende Wirkung des durch die Luftöffnungen eintretenden Luftstrahles

beeinflusst werden können. Die turbulenzhervorrufende Wirkung des an den Brennerseitenwänden eintretenden Luftstrahles kann durch die Erhöhung des Impulses der eintretenden Luft gesteigert werden, die gleichzeitig eine Erhöhung des einströmenden Luftmassenstromes bewirkt. Die Anfangsgeschwindigkeit und der Impuls des eintretenden Luftstrahles wird bei einem vorgegebenen Querschnitt durch die Differenz der im Brennraum herrschenden Drücke bestimmt, wodurch eine Verbesserung des Mischverhältnisses und die Zunahme des Luftüberschusses durch die — vom Ventilator erzeugte — Streigerung dieser Druckdifferenz zu erwarten ist.

Das Maß der Rußbildung hängt bei gegebener Konstruktion auch mit dem Luftüberschuß und der Flammentemperatur zusammen. Um nämlich die Verbrennung der entstandenen Rußteilchen sichern zu können, ist das Vorhandensein einer entsprechend hohen Temperatur und das Vorhandensein von Sauerstoff sowie eine genügende Aufenthaltszeit in der Zone mit hoher Temperatur erforderlich. Es besteht ein Optimum des Luftüberschusses. Bei geringem Luftüberschuß erfolgt nämlich die Verbrennung unvollkommen. Bei zu großem Luftüberschuß sinkt hingegen die Verbrennungsraumtemperatur unter Einfluß der vielen kalten Luft und die entstandenen primären Rußteilchen verlassen infolge der zu großen Strömungsvolumens die Hochtemperaturzone zu schnell.

Bei der Untersuchung der Betriebsbedingungen und der Gründe der Rußbildung können bei einem gegebenen Verbrennungsraum die nachstehenden Behauptungen getroffen werden:

a) Der Verbrennungsraum wird bei großen Belastungen aus Konstruktionsgründen mit äußerst geringem Luftverhältnis ( $m = 1,15-1,19$ ) betrieben. Es ist zweifellos, daß bei Verbrennungseinrichtungen innerhalb den realen Gegebenheiten nach der Realisation eines möglichst kleinen Luftverhältnisses gestrebt wird, um eine Verminderung der Verbrennungsverluste eine Erhöhung der Verbrennungsendtemperatur und dadurch eine Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades der Einrichtung zu erreichen. Ein geringes Luftverhältnis erfordert eine intensive Vermischung der Luft mit den Dämpfen des Brennstoffes. Das Erzeugen dieses Zustandes ist besonders für Brenner auf Verdampfungsbasis eine schwierige Aufgabe, da relativ kleine Energien zum Ausgleich der bei der Vermischung von Luft und Brennstoff entstehende Wirbelverluste vorhanden sind. Aus diesem Grund muß bei Brennern auf Verdampfungsbasis mit vornherein größerem Luftverhältnis die vollkommene Verbrennung im Vergleich zu den Brennern auf Vergaserbasis gesichert werden.

b) Bei dem sich ausbildenden Luftverhältnis haben sich als Folge der notwendig unvollkommenen Vermischung brennstoffreiche Zonen ausgebildet, die eine unvollkommene Verbrennung des Brennstoffes und Rußbildung verursacht haben. In diesen brennstoffreichen, örtlichen Bereichen entstand ein bedeutender Luftmangel,  $m < 1$ , weshalb die örtliche Verbrennungsendtem-

peratur infolge des Wärmebedarfes zur Erwärmung des wegen fehlenden Sauerstoffes nicht verbrennbaren Brennstoffes und infolge der zur Deckung der Verdampfungswärme benötigten Wärmemenge gesunken ist. Der als Folge der gesunkenen Verbrennungsendtemperatur sowie des Luftmangels während der thermischen Spaltung entstandene Ruß kann nicht verbrannt werden, sondern bildet an der Brennraumseitenwand und am Brennraumboden abgelagert eine feste, fettige, bröckelnde Substanz.

c) Die Schlußfolgerung, wonach die Rußbildung eine Folge des sich infolge der unrichtigen Gemischbildung ergebenden örtlichen Luftmangels ist, wurde dadurch glaubhaft gemacht, daß sich in erster Linie an solchen Stellen Ruß abgelagert hatte, wo aus Konstruktionsgründen in einsehbarer Weise eine Möglichkeit zur Ausbildung eines örtlichen Luftmangels gegeben war. Eine starke Rußablagerung war am Boden des Verdampfungsraumes bis zur tiefsten Lochreihe zu verzeichnen (s. Abb. 2).

Die Ursache für diese Erscheinung war, daß bei großer Belastung ein bedeutender Teil des an der Mitte der Verdampfungsplatte austretenden Öles auf den Boden des Verdampfungsraumes fließt, und dort auch der Verdampfungsvorgang einsetzt. Die Lufteintrittsöffnungen befinden sich aber wesentlich oberhalb dieses Niveaus, wodurch zu dem Boden des Verbrennungsraumes, wo der überwiegende Teil des Brennstoffes verdampft, die Luft nur durch mittelbare Luftbewegung, durch Wirbelbewegung, gelangt, weshalb hier Luftmangel entsteht. Aus diesem Grund beginnt ein Krackvorgang wodurch schwere Kohlenwasserstoffe und Ruß entstehen. Ein weiteres Gebiet mit Luftmangel ist das Zentrum des Verbrennungsraumes, wo die Intensität der Verdampfung infolge der beiden übereinander untergebrachten Verdampfungsoberflächen höher ist, jedoch die Lufteintrittsöffnungen entlang des Umfanges gleichmäßig gelagert sind.

Die Öldämpfe passieren nach ihrer Verdampfung nach oben luftarme Räume von höherer Temperatur. Bei hoher Temperatur erfolgt die Zersetzung der Kohlenwasserstoffe, doch besteht wegen fehlenden Sauerstoffes keine Möglichkeit zur gleichzeitigen Oxydation der Kohlenwasserstoffe. Deshalb enthalten die Zersetzungsprodukte Ruß und schwere Kohlenwasserstoffe in großer Menge. Da die Seitenwand des Verbrennungsraumes unter Einfluß der einströmenden und eine Abkühlung verursachenden Luft im Vergleich zur Flamme immer kälter ist, erfolgt die Ablagerung des entstandenen Rußes im Verbrennungsraum.

Der Zündvorgang des während der thermischen Zersetzung entstandenen Rußes und der schweren Kohlenwasserstoffe gestaltet sich auch unvorteilhaft, weshalb diese in sauerstoffreiche Gebiete gelangend auch schwer zu verbrennen sind. Um eine Rußablagerung vermeiden zu können, scheint eine geringfügige Vergrößerung des Luftüberschusses notwendig zu sein. Gleichzeitig sollen im Verbrennungsraum die luftarmen Räume beseitigt werden.

Durch die Steigerung des vom Ventilator erzeugten  $\Delta p$  Überdruckes nimmt die Geschwindigkeit des durch die Brennraumböhrungen eintretenden Luftstrahles zu, dadurch wird auch die Gesamtmasse und der Impulse der Luft größer. Somit erhöht sich das Luftverhältnis und die Vermischungsverhältnisse verbessern sich ebenfalls einigermaßen.

Auf diese Weise kann aber der an den bezeichneten Stellen des Verbrennungsraumes entstehende Luftmangel entscheidend nicht beseitigt werden. Übrigens bestand bei der gegebenen Einrichtung keine Möglichkeit zu einer Veränderung der Betriebsbedingungen. Um die Bedingungen der richtigen Gemischbildung und der vollkommenen Verbrennung sichern zu können, sollte einerseits die Anordnung der primären Lufteintrittsöffnungen des Verbrennungsraumes modifiziert werden und andererseits soll der Gesamtquerschnitt dieser Böhrungen vergrößert werden. Somit nimmt bei unveränderten Betriebsbedingungen (unveränderter Druck vor dem Verbrennungsraum) der Luftüberschuß zu wodurch in die luftarmen Räume Zusatzluft einströmt.

Eine entscheidende Verbesserung wurde im Verlaufe der Versuche dadurch erreicht, daß ein Teil der Verbrennungsluft unter der Ebene der Verdampfungsplatte eingeführt wurde. Dadurch können sich die am Boden des Verbrennungsraumes sich verdampfenden Öldämpfe unmittelbar mit der Verbrennungsluft vermischen und so ergibt sich schon in einem dem Siedepunkt naheliegenden Temperaturbereich die Möglichkeit zur Oxydation der Kohlenstoffe vor ihrer Entzündung. Um die örtlichen Gebiete mit Luftmangel beseitigen zu können, schien es zweckmäßig, die Menge der Verbrennungsluft auch in dem hochliegenden zentralen Teil des Verbrennungsraumes mit Hilfe von um die Eintrittsöffnung ausgebildeten Lufteintrittsböhrungen zu erhöhen, da hier aus konstruktiven Gründen der Verdampfungsvorgang mit größerer Intensität verläuft. Abb. 3 zeigt die Anordnung der nach diesen Überlegungen ausgebildeten Lufteintrittsböhrungen. Die nach diesen Gesichtspunkten aus-

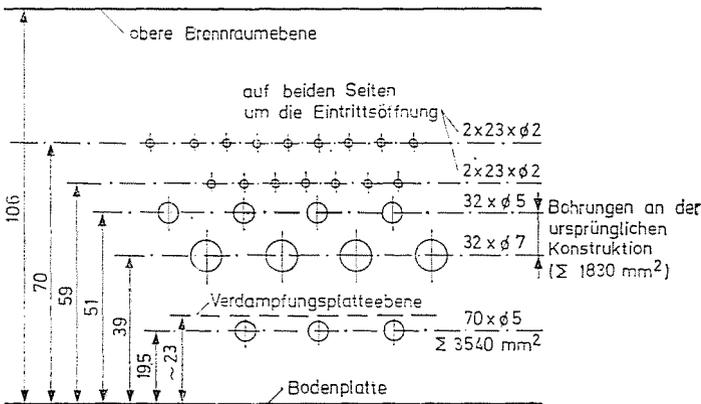


Abb. 3. Die Anordnung der Lufteinlaßböhrungen an der Seitenwand des Verbrennungsraums

gebildete Konstruktion wurde mit einer minimalen konstruktiven Veränderung mit den mit der ursprünglichen Konstruktion übereinstimmenden verbrennungstechnischen Parametern ohne Rußbildung, sogar bei einer 10%-en Überlast betrieben.

### Schlußfolgerungen

Die Ölbrenner auf Verdampfungsbasis sind gegenüber Kohlenstoffausscheidung sehr empfindlich. Man kann unterscheiden zwischen Ursachen des Entstehens und der Erscheinungsform von Ölkoks und Ölruß.

Koks entsteht an der Eintrittsstelle des Brennöls und an den Stellen der Verdampfungsfläche mit höherer Temperatur. Während der Verdampfung entweichen die flüchtigen Komponenten, und der am Ende der thermischen Zersetzung zurückbleibende feste Rest ist Ölkoks. Bei Ölbrennern auf Verdampfungsbasis, wo das Öl von einer stabilen Oberfläche verdampft, sind die Umstände zum Ausscheiden von Ölkoks günstig, weshalb in diesen Einrichtungen nur Öle mit geringer Neigung zum Verkoksen und ohne Rest verdampfbar verbrannt werden dürfen.

Ölruß entsteht aus den während der Verdampfung bzw. des Verkoksens freigewordenen und verkrakkten flüchtigen Komponenten aus der Gasphase in molekuläre Größenordnung.

Der ausscheidende Ruß ist fettig und bröckelnd. Die in den Ölbrennern auf Verdampfungsbasis sich ausbildende Flamme kann angenähert als eine Diffusionsflamme betrachtet werden, wobei sich ein bedeutender Anteil der Kohlenwasserstoffe vor der Oxydation in Abhängigkeit von der Temperatur in Ruß (bzw. schwere Kohlenwasserstoffe) und Wasserstoff verkrakkt. Der Ruß und die schweren Kohlenwasserstoffe sind schwer anzündbar. Mit einer entsprechenden Gemischbildung kann die Rußbildung und die im Verbrennungsraum ablaufende Rußablagerung vermieden werden. Dazu muß eine gleichmäßige und schnelle Vermischung der Öldämpfe und der Verbrennungsluft gesichert werden, damit die Kohlenwasserstoffe schon bei niedrigen Temperaturen oxydiert werden. Die bei der Oxydation entstandenen Produkte sind leicht anzündbar.

Allgemein kann festgestellt werden, daß bei den Ölbrennern auf Verdampfungsbasis ein Teil der Verbrennungsluft unmittelbar über der Verdampfungsfläche eingeführt werden soll, um die Rußbildung zu vermeiden. So können die verdampfenden Öldämpfe schon bei zum Siedepunkt naheliegenden Temperaturen — vor der thermischen Spaltung — sich mit der Luft vermischen und oxydiert werden. Bei der Wahl der weiteren Lufteinführungsstellen muß die Verteilung der Verdampfungsintensität und die Strömungsrichtung der brennfähigen Oxydations- bzw. Spaltprodukte im Verbrennungsraum berücksichtigt werden.

Die thermische Zersetzung der Kohlenwasserstoffe und die Rußausscheidung können vollständig nicht vermieden werden, und dies ist auch nicht das Ziel, da der ausgeschiedene Ruß verbrennend die Flamme leuchtend macht und die Wärmestrahlung verbessert. Die Verbrennung des entstandenen Russes in der Flamme muß aber unter Zuleitung von Sauerstoff bzw. Luft und durch Einhaltung einer genügend hohen Flammentemperatur gesichert werden.

### Literatur

1. LAVROV-SURÜGIN: Die Grundlagen der Verbrennung und der Vergasung (ungarisch) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965
2. FRITSCH, W. H.: Ölkoks und Ölruß, *Energie* 7, 415—426 (1955)
3. KAISER, E.: Rußbildung in Ölfeuerungen, Öl- und Gasfeuerung, 13, 213—270 (1968)
4. KISS-HUNYADI, I.: Die Untersuchung der Verkokungsvorgänge von Ölbrennern auf Verdampfungsbasis. Dissertation. TU Budapest, 1976

Dr. Ildikó KISS-HUNYADI H-1521 Budapest