

## Verbrennung und Vergasung schwerer flüssiger Kraftstoffe in einer Wirbelkammer

Von Dr.-Ing. H. A. Havemann<sup>1)</sup> und K. Mahadevan, B. E.<sup>2)</sup>

Aus dem Laboratorium für Verbrennungsmotoren, Indian Institute of Science, Bangalore — Südindien

*Es wird über Entwurf, Bau und Versuchsbetrieb einer kleinen Zyklon-Brennkammer berichtet, die in erster Linie schwere flüssige Kraftstoffe, wie Diesel- und Bunkeröl, verwerten sollte, die zunächst verbrannt, dann auch vergast wurden. Dabei wurde der gleiche Kraftstoff in wechselnder Mengenzuteilung in einer am Kammereingang angeordneten Primärzone und in einer nacheinander an verschiedenen Stellen stromab befindlichen Sekundärzone eingespritzt. Es ergab sich, daß stabiler Betrieb, selbst bei alleiniger Sekundäreinspritzung, möglich war und daß bei weitgehend vollkommener Verbrennung die Druckverluste nur verhältnismäßig gering waren. Im Falle der Vergasung erzielte die Sekundäreinspritzung vom Rande des Wirbels aus in Richtung der Gasbewegung beste Ergebnisse).*

*The report describes the design, construction and experimental operation of a small cyclone chamber in which Diesel and bunker oil is burnt and also gasified. It was found that continuous operation was possible even with injection into the secondary zone alone. For almost complete combustion the pressure losses were comparatively low. Gasification was most successful when the secondary injection was made from the border of the swirl in the direction of the gases.*

*Les auteurs décrivent le plan, la construction et le mode d'opération d'une petite chambre-cyclone de combustion utilisant l'huile Diesel et l'huile lourde. On a trouvé que l'injection secondaire seule suffit pour rendre une opération continue et que, même dans le cas d'une combustion presque complète, les pertes de pression sont minimes. L'injection secondaire effectuée au bord du tourbillon dans la direction des gaz donne les meilleurs résultats de gazéification.*

### 1. Einleitung

#### 1.1 Grundlagen

Das System der Wirbelbrennkammer bietet den Vorteil, daß Kraftstoffe mit normalerweise langsamer Brenngeschwin-

digkeit bis zu verhältnismäßig vollkommener Verbrennung in ihr zurückgehalten werden. Dabei führt eine geordnete relative Strömung der Verbrennungsluft den auf einer etwa kreisförmigen Bahn um die Kammerachse sich bewegenden Brennstoffteilchen Sauerstoff zu und beschleunigt zudem Austauschprozesse, die für den zeitlichen Ablauf der Verbrennungs- oder Vergasungsvorgänge bestimmend sind [1]. Die Brennstoffteilchen werden dabei in einem Gleichgewicht zwischen der Zentrifugalkraft und dem Widerstand der Gasströmung gehalten, das für große Teilchen im Bereich grö-

<sup>1)</sup> Professor am „Indian Institute of Science“ und Leiter des Laboratoriums.

<sup>2)</sup> B. Eng., Ass.-Professor.

<sup>3)</sup> Der Bericht stammt aus dem Laboratorium für Verbrennungsmaschinen am „Indian Institute of Science“ in Bangalore, Indien, und stellt einen Auszug aus einer Arbeit von K. Mahadevan dar, die im Dezember 1955 eingereicht wurde.

ßerer Radien und für kleinere Teilchen in der Nähe der Brennkammerachse gewahrt ist, so daß sich während des Abbrandes eine langsame Annäherung des Teilchens an die Achse ergibt. Die radialen Abmessungen der Kammer sind somit für die Grenzen der Teilchengrößen, wenigstens im Bereich etwa gleichbleibender Dichte, bestimmend. Durch eine besondere Wandform läßt sich weiterhin eine stabile Führung des Teilchens wenigstens theoretisch erwarten [2]. Wegen der allgemein geordneten Strömung sollte ein geringerer Druckverlust auftreten als in Brennkammern, bei denen die Relativbewegung zwischen Brennstoff und Gas durch Richtungsänderungen und turbulente Ausbildung der Gasbewegung erzielt werden muß.

Der Aufbau einer Wirbelkammer ist schematisch in Bild 1 gezeigt. Vorverdichtete Luft tritt durch die Zuleitung (a) in die Primärzone ein, die die Brennstoffeinspritzdüse (b) und entsprechende Wirbeleinsätze zur Flammenstabilisierung trägt und strömt von da in den eigentlichen Brennraum und damit in eine Sekundärzone (c) ein, in der die Brennstoffteilchen während des Verbrennungsvorganges gehalten werden. Nach weitgehendem Abbrand verlassen sie die Kammer durch die koaxiale Öffnung (d). Gewisse Wandformen (e) erreichen eine stabile Teilchenführung unter idealisierten Strömungsbedingungen.

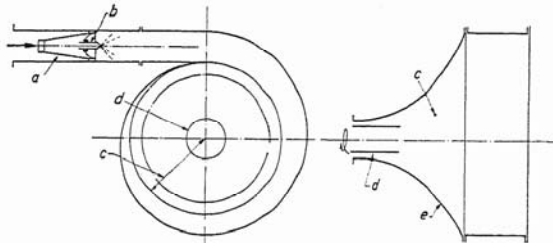


Bild 1. Schematische Anordnung der Wirbelbrennkammer

## 1.2 Aufgabenstellung

Aufgabe der Versuche war es, die Kammer zunächst auf ihre Verwendbarkeit als Brennkammer zu prüfen, wobei das Augenmerk besonders auf Ausbrand und Druckverlust gerichtet war. Mit der Annäherung an stöchiometrischen Betrieb waren betriebliche Schwierigkeiten zu erwarten. Nach Abschluß dieser Entwicklung sollten Versuche mit zusätzlicher Einspritzung in den Wirbelkörper vorgenommen werden, womit die Kammer als Gasgenerator arbeiten würde. Hierbei besteht auf Grund des Temperaturverlaufes die Gefahr einer instabilen Strömungsform des Wirbels. Dieses sowie das Problem der Anordnung und Richtung der Sekundärkraftstoffzufuhr sollten weiterhin bearbeitet werden.

## 2. Versuchseinrichtung

### 2.1 Brennkammer-Entwurf und Konstruktion

Am Laboratorium war ein Verdichter, der 10 m<sup>3</sup> Luft je Minute bei etwas höherem als atmosphärischem Druck lieferte, verfügar, womit der Durchfluß durch die Wirbelkammer mit etwa 6 m<sup>3</sup>/min gegeben war. Mit diesem Ausgangswert und Annahmen über die Abmessungen der Brennstoffteilchen und dem Verhältnis ihrer größten und kleinsten Abmessungen, die mit 40  $\mu$  und mit 4:1 gewählt wurden, kann die Kammer in ihren wesentlichen Abmessungen festgelegt werden [2]. Der Stabilitätsfaktor, der das Verhältnis des Anstieges der das Flüssigkeitsteilchen im Gleichgewicht haltenden Kräfte am Orte des Teilchens ausdrückt, wurde dabei zunächst mit 0,2 angenommen. Eine weitere Größe ist der Exponent der tangentialen Gasgeschwindigkeitsverteilung unter Betriebsbedingungen, die in Abwesenheit verlässlicher Informationen auf 0,75 festgesetzt wurde. Daneben tritt noch eine Konstante im Widerstandsgesetz — nach Stokes — auf, wofür der Brennstofftropfen als kugelförmig angesehen werden muß. Schließlich muß eine Wahl für die mittlere Gastemperatur getroffen werden, die im Hinblick auf stöchiometrischen Betrieb mit 1400° C angenommen wurde, womit dann auch die Zähigkeit bestimmbar wird.

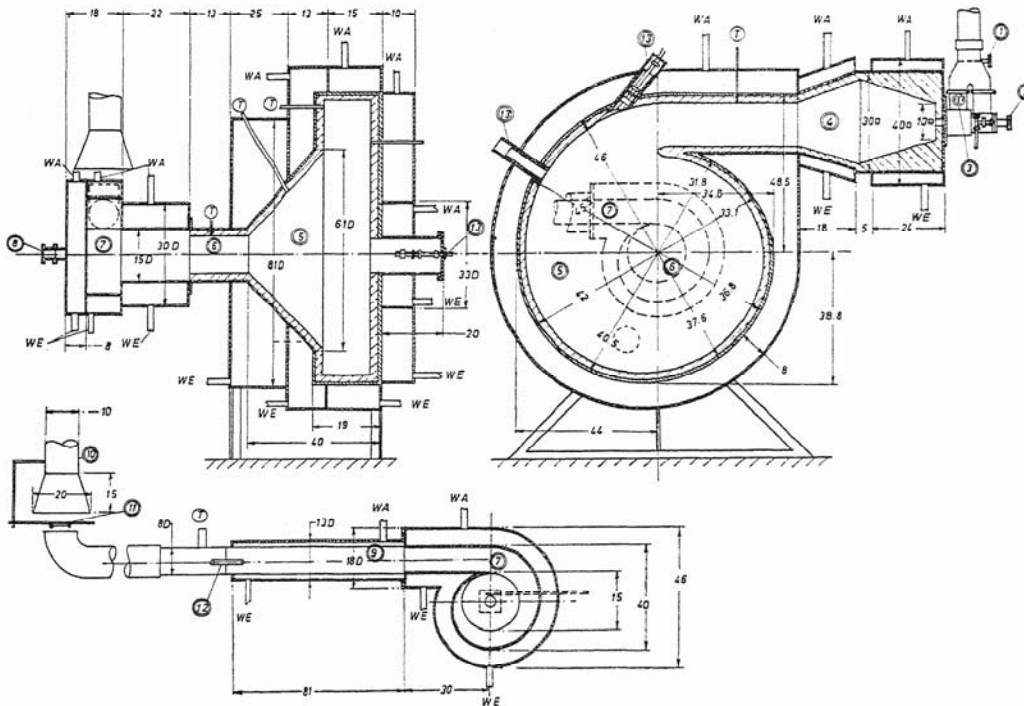


Bild 2. Aufbau der Versuchs-Wirbelbrennkammer (Längen in cm)

Mit diesen Annahmen lassen sich aus der Reihe möglicher Ausführungen unter Berücksichtigung leichter Herstellbarkeit die folgenden Hauptabmessungen ableiten: Radius des inneren Teiles (bezeichnet mit  $c$  in Bild 1) 30,5 cm; Einlaßöffnung der Spirale 19,6 cm (axial) mal 18,3 cm; Einlaßgeschwindigkeit 17,4 m/sec. Die Wände wurden nicht gekrümmt, sondern stumpf konisch zulaufend hergestellt.

Die Brennkammer ist in Bild 2 dargestellt und ihr Aufbau soll im folgenden beschrieben werden: Luft tritt, durch ein Handrad 1 reguliert, in einen Schweröl-Brenner von oben ein, dem von unten, ebenfalls durch ein Handrad 2 beeinflussbar, Kraftstoff zufließt. Eine Zusatzregulierung 3 erlaubt die Zumessung der Luft auf die erste oder zweite Brennerstufe. Die Flamme erstreckt sich zunächst in die Primärzone 4 und von dort in den eigentlichen Wirbelkörper 5, an den sich der axiale Auslaßstutzen 6 anschließt, der sich in die Auslaßspirale 7 öffnet. In ihrer Abdeckplatte befindet sich eine mit einer Quarzscheibe gesicherte und achsial gerichtete Beobachtungsöffnung 8. Thermolemente sind in der Abbildung durch T bezeichnet. — Die Gase durchfließen schließlich ein gerades Rohr 9, an dessen Ende Vorrichtungen zur Gasprobenentnahme 12 vorgesehen sind, und treten über einen Krümmer in den Kamin 10 ein. An der Stelle des freien Austritts ist eine Anordnung 11 vorgesehen, die es erlaubt, kurzzeitig eine präparierte Glasplatte in den Gasstrom — für etwa 3 Sekunden — einzuschwenken, um feste Rückstände der Beobachtung zugänglich zu machen.

Die Kammer war zunächst für Luftkühlung eingerichtet gewesen, doch ergaben sich örtliche Überhitzungen, die endgültig nur durch 25 mm starke Ausmauerungen und durch Wasserkühlung vermieden werden konnten. In ihrem Bereich betrug die Wandstärke 1,6 mm, um den Ölbrenner herum 3,2 mm, und für das Übergangsstück von dort zum Kammereinlaß 6,4 mm. Wassereinlaß- und Auslaßstutzen sind mit WE und WA gekennzeichnet.

Für den Betrieb als Gaserzeuger waren Halterungen 13 für Einspritzdüsen vorgesehen, und zwar an der Peripherie des Brennraumes in radialer sowie in tangentialer Richtung und in dessen Achse gegenüber dem Auslaß.

Einrichtungen zur Messung des statischen Druckabfalles zwischen Eintritt und Auslaß vervollständigen die Konstruktion der Versuchskammer.

### 2.2 Versuchsaufbau

Der Plan des Versuchsaufbaues ist in Bild 3 dargestellt. Die Verbrennungsluft, vom Kompressor 2 geliefert, tritt über eine Rohrleitung, die das Regulierauslaßventil 6 trägt, in die Primärzone 13 der Brennkammer durch den Brenner 14 ein. Die Luftmenge wird dabei durch die Blende 11 und das mit Alkohol gefüllte U-Rohr 11a bestimmt, während der statische Luftdruck am mit Quecksilber gefüllten Manometer 5 und die Lufttemperatur mit einem Quecksilberthermometer 8 gemessen wurde. Weitere Manometer 15a und 15b erlaubten, den statischen Druckabfall zwischen Einlaß und Austritt aus der Brennkammer vor und nach dem Spiralgehäuse zu bestimmen. Mit Hilfe eines regulierbaren Motors 3 wurde der Kraftstoff zum Brenner gepumpt und zur besseren Strahlaufbereitung in einem Wasserbad 4 vorgewärmt. Die gleiche Anlage 7 und 4 wurde für den für die Sekundärstufe bestimmten Kraftstoff verwendet, dessen Druck am Manometer 9 abgelesen und wahlweise an den Stellen 10, 10a und 10b eingespritzt werden konnte, falls die Kammer als Gasgenerator betrieben werden sollte. Der Kraftstoffverbrauch wurde durch Wagen des Vorratsbehälters bestimmt.

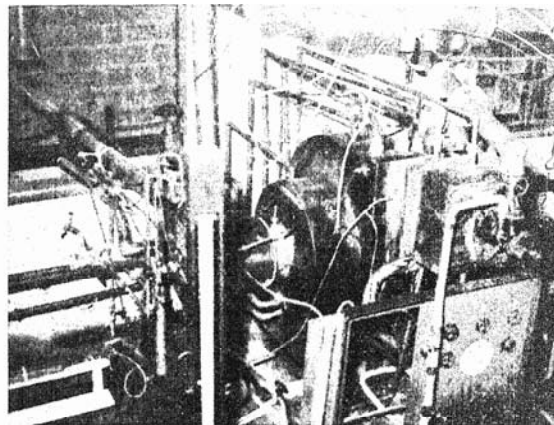


Bild 4. Versuchsaufbau der Wirbelbrennkammer

Ein Einblick in die Brennkammer 12 und Beobachtung der Flammenbildung wurde durch eine gesicherte Öffnung 17 ermöglicht. Der Auslaß 16, in der Abbildung verkürzt dargestellt, erlaubte es, die Abgase im Übertritt in den Kamin zu beobachten. Die dort, wie oben beschrieben, aufgefangenen festen Rückstände wurden später in einem Zeiss-Optomikroskop hinsichtlich ihrer Größe untersucht.

Stromauf in der Auslaßleitung war eine Vorrichtung zur Gasentnahme mit Kühlung 18, Reinigung 19 und Trocknung 20 vorgesehen. Die Gasproben wurden in die Bürette 21 durch eine motorgetriebene 23 Vakuumpumpe 22 eingesaugt und dann mit einem Hempelapparat analysiert.

Bild 4 zeigt eine photographische Wiedergabe des gesamten Versuchsaufbaues.

### 2.3 Brennstoffwahl

Die Auswahl der Kraftstoffe erfolgte nach Gesichtspunkten der Verfügbarkeit und leichteren Behandlung, und so wurden zwei Öle verwendet, deren Eigenschaften in der Zahlentafel aufgeführt sind:

#### Eigenschaften der verwendeten Kraftstoffe

Kraftstoff	Diesel-Öl Kl. B.	Bunker-Öl
Spez. Wichte	0,87	0,90
Cetanzahl	40	—
Zähigkeit Redwood I (38° C)	45	390
Kohle-Rückstand (Gewicht) %	1,0	4,8
Schwefelgehalt (Gewicht) %	1,2	2,5

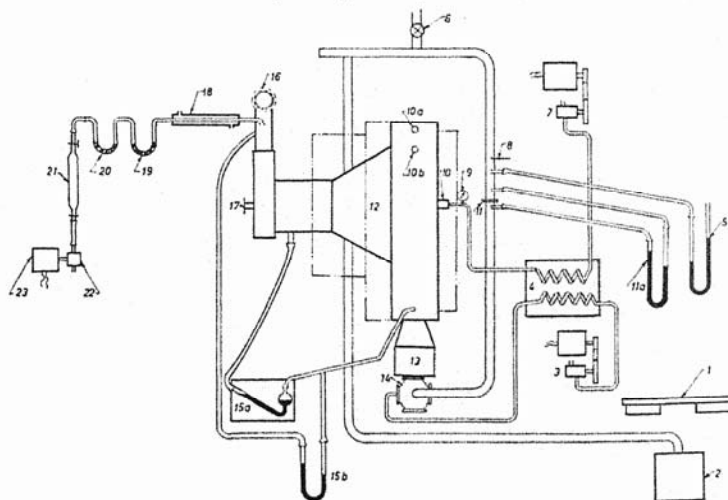


Bild 3. Versuchseinrichtung

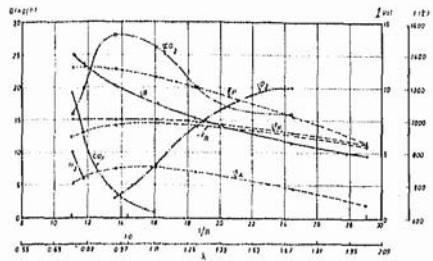


Bild 5. Meßwerte für Primärzoneninspritzung von Dieselöl für 4,63 (Bild 5a) und 5,58 (Bild 5b) kg Luftdurchsatz je min. (L/B = Luft-Kraftstoff-Verhältnis,  $\lambda$  = Luftverhältnis, B = Kraftstoffverbrauch in kg/h,  $t^{\circ}C$  = Temperaturen,  $\%$  = Vol. Volumenanteil im Abgas)

Wassergehalt (Volumen) %	0,05	0,10
Niederschlag (Gewicht) %	0,01	0,01
Aschengehalt (Gewicht) %	0,1	0,01
Unt. Heizwert (kcal/kg)	10 580	10 300

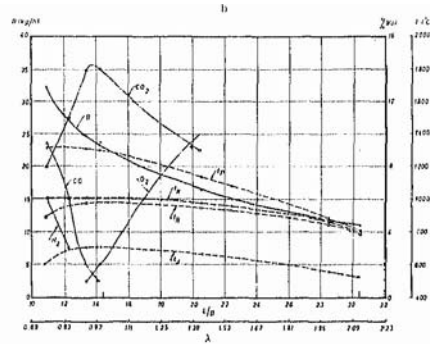
3. Versuchsergebnisse

Die Versuche wurden zunächst auf die Primärzone beschränkt und sollten somit die normalen Brennkammer-Betriebsverhältnisse klären. Danach sollte durch zusätzliche Kraftstoffzufuhr in die Sekundärzone die Möglichkeit eines Betriebes der Kammer als Gasgenerator untersucht werden. Weiterhin sollte die Frage der Flammenstabilisierung durch alleinige zentrale Kraftstoffeinspritzung entschieden werden.

3.1 Betrieb als Brennkammer mit Kraftstoffzufuhr zur Primärzone:

Diese Versuche wurden unternommen, um die Grenzen des Betriebes mit alleiniger Kraftstoffeinspritzung in die Primärzone festzustellen. Ihre Ergebnisse müssen jedoch im Hinblick auf das wesentliche Ziel der Arbeit verstanden werden, die darin bestand, die Möglichkeiten der Kammer für Generatorbetrieb, bei dem die Primärzone etwa stöchiometrisch arbeiten würde, abzuschätzen. Sie sind daher nicht allgemein mit anderen nur für Brennkammerbetrieb gedachten Apparaturen vergleichbar.

Zunächst wurde Dieselöl als Kraftstoff verwendet, der den oben gegebenen Eigenschaften entsprach. Die mit Einspritzung in die Primärzone erzielten Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt, und zwar in Bild 5a für einen Luftdurchsatz von 4,63 kg/min entsprechend etwa 68% voller Belastung und in Bild 5b für 5,58 kg/min entsprechend 82% voller Belastung. Als Abszisse wurde das Luft-Kraftstoffverhältnis L/B und



das Luftverhältnis  $\lambda$  gewählt, das bei dem stöchiometrischen L/B-Wert von 14,4 den Wert „1“ hat [3]. Aufgetragen ist der Kraftstoffverbrauch B in (kg/h) — ausgezogene Linie, linker Maßstab — die Gaszusammensetzung (Vol. %) strichpunktiertere Linien und rechter Maßstab — und die gemessenen Temperaturen ( $^{\circ}C$ ) — punktierte Linien — wobei  $i_A$  am Auslaß,  $i_B$  stromab am horizontalen Rohr,  $i_P$  am konischen Teil und  $i_P$  an der Peripherie der Brennkammer gemessen worden.

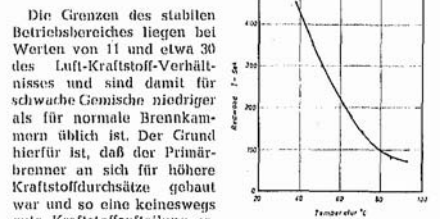


Bild 7. Zähigkeitwerte, Redwood-1-Sekunden für Bunkeröl in Abhängigkeit von der Temperatur,  $^{\circ}C$

Die Grenzen des stabilen Betriebsbereiches liegen bei Werten von 11 und etwa 30 des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses und sind damit für schwache Gemische niedriger als für normale Brennkammern üblich ist. Der Grund hierfür ist, daß der Primärbrenner an sich für höhere Kraftstoffdurchsätze gebaut war und so eine keineswegs gute Kraftstoffaufteilung erzielte. Außerdem waren bauliche Mittel, wie sie sonst angewendet werden, um sicheren Betrieb bei großem Luftüberschuß zu erreichen, nicht vorgesehen.

In der Nähe stöchiometrischer Zusammensetzung wurde jedoch zufriedenstellender Betrieb ohne Rauchgastrübung und mit kurzer Flamme erreicht, wobei die Gehalte an CO und  $O_2$  — unter 2% — dafür zeugen, daß der Ausnutzungsgrad der Luft hoch war. Etwas unterhalb stöchiometrischer

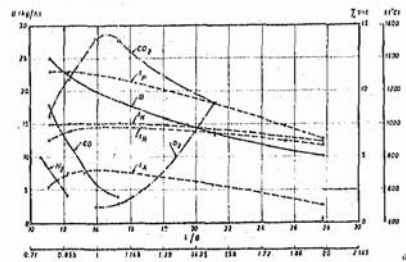
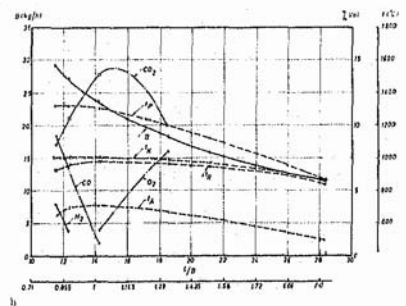


Bild 6. Meßwerte für Primärzoneninspritzung von Bunkeröl für 4,03 (Bild 6a) und 5,58 (Bild 6b) kg Luftdurchsatz je min. Bezeichnungen wie in Legende des Bildes 5)



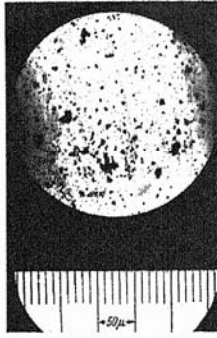


Bild 8. Rückstände bei Betrieb mit Bunkeröl bei Luftmangel, Vergr. 250fach

henden Rückstände mit jetzt mehr rötlicher Flamme unter leichter Rauchentwicklung ab. Bis zu Luftverhältniswerten von 11 konnte stabiler Betrieb mit höchsten CO- und H<sub>2</sub>-Gehalten von etwa 10% und 6% und einem Anteil von CO<sub>2</sub> von 8% aufrechterhalten werden. Die Temperaturen in diesem Gebiet streben einem Höchstwert bei Luftverhältnissen von etwa 12,5 zu und fallen im Bereich geringerer Werte besonders an den dem Ausgang zu liegenden Meßstellen wieder ab. Dies läßt den Schluß zu, daß örtlich vollständige Verbrennung mit nachfolgender Reduktion im konischen Teil und im Auslaßrohr vorliegen könnte.

Bild 6 stellt Versuchsergebnisse, in gleicher Weise aufgetragen wie in Bild 5, dar, die mit Bunkeröl erzielt wurden, das auf 72°C vorgewärmt wurde. Hierdurch wird seine Zähigkeit auf einen Wert von 130 Redwood-Nr. I-Sekunden gebracht — siehe Bild 7 —, während ihr Wert 52 Redwood-Sekunden für das vorher verwendete Öl bei einer Temperatur von 25°C betrug.

Der Vergleich zeigt, daß kaum wesentliche Unterschiede gefunden wurden. Die Abgase waren bei stöchiometrischem und dabei durchaus stabilem Betrieb, der hier bei einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von 14 [2] vorlag, rauchfrei. Geringere Werte konnten erzielt werden und eine Probe von Rückständen, die hierbei genommen wurde, ist in Bild 8 wiedergegeben. Die überwiegende Zahl der Teilchen haben Durchmesser bis zu 10 µ, ein Umstand, der für die Begrenzung der Größe der die Kammer verlassenden Teilchen spricht.

3.2 Betrieb mit Kraftstoffzufuhr zu beiden Zonen und zur Sekundärzone allein

Die weiteren Versuche wurden mit Dieselöl und mit Einspritzung in beide Zonen vorgenommen, wobei zunächst die Primärzone allein, und nach Stabilisierung die Sekundärzone allmählich und in steigendem Maße mitbetrieben wurde. Dabei wurde die sekundäre Kraftstoffeinspritzung an den folgenden Stellen vorgenommen:

Zusammensetzung schien sich der Anteil an O<sub>2</sub> zu vermindern, der von CO<sub>2</sub> und CO zu vermehren, doch fiel bei weiterer Anreicherung der Gehalt an CO<sub>2</sub> wieder ab. Hierbei wuchs die Länge der Flamme, die leicht blau bis orange gefärbt am offenen Ende des Abgasrohres sichtbar wurde. Wegen des Gehaltes an CO und H<sub>2</sub> könnte eine Entzündung der Gase bei Austritt an die Atmosphäre vorliegen. Bei noch reicheren Gemischen konnten die Abgase gelegentlich fremd entzündet werden, brannten normalerweise jedoch beim Austritt auf Grund der mitgeführten glühenden Rückstände.

- a) an der Peripherie der Einlaßspirale in tangentialer Richtung im Sinne der Luftbewegung, also „stromab“,
- b) wie bei a), jedoch gegen die Richtung der Luftbewegung, also „stromauf“,
- c) in der Achse der Kammer.

In einigen Versuchen wurde nach Inbetriebnahme der Sekundäreinspritzung die Kraftstoffzufuhr zur Primärzone herabgesetzt und schließlich ganz stillgelegt.

Die Versuchswerte sind in Bild 9a bis c dargestellt und als Ergebnis kann hervorgehoben werden, daß nur bei zusätzlicher Einspritzung stromab von der Peripherie der Kammer aus stabiler Betrieb mit gutem Verbrennungswirkungsgrad gewährleistet war.

Mit Dieselöl konnte ein Luftverhältnis kleiner als 1 erzielt werden, wobei der Gehalt an O<sub>2</sub> unter 2% war. Bei einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von 12,4 war der Gehalt an CO<sub>2</sub> 4,1% und eine blau-orange gefärbte Flamme mit Spuren von Rauch wurde am Ende des Abgasrohres sichtbar. Die Kammer arbeitete dabei stabil, selbst als die Kraftstoffzufuhr zum Primärbrenner unterbrochen wurde, und konnte mit Sekundäreinspritzung allein bis zu einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von 14,2, also eben unterhalb des stöchiometrischen Verhältnisses, betrieben werden. Unter diesen Bedingungen war der Sauerstoffgehalt im Abgas 4%. Als die Kraftstoffzufuhr verringert wurde, blieben stabile Verhältnisse bis zu einem Luftverhältnis von 3,6 erhalten. Der Versuch zeigt, daß ein Ring brennender und in „Schwebel“ gehaltener Tropfen im Sinne eines Brennkammerbetriebes stabil ist, ohne daß ein System von Leitblechen mit dem mit ihm verknüpften Druckverlust notwendig wäre. — Jenseits dieses Wertes wurde Rauch im Abgas sichtbar, wohl wegen der auf Grund des niedrigen Kraftstoffdruckes sehr groben Zerstäubung.

Die anderen Anordnungen der Sekundäreinspritzung führten zu starker Abgastrübung, sobald beide Systeme arbeiteten. Zwar konnte auch in diesen Fällen die primäre Kraft-

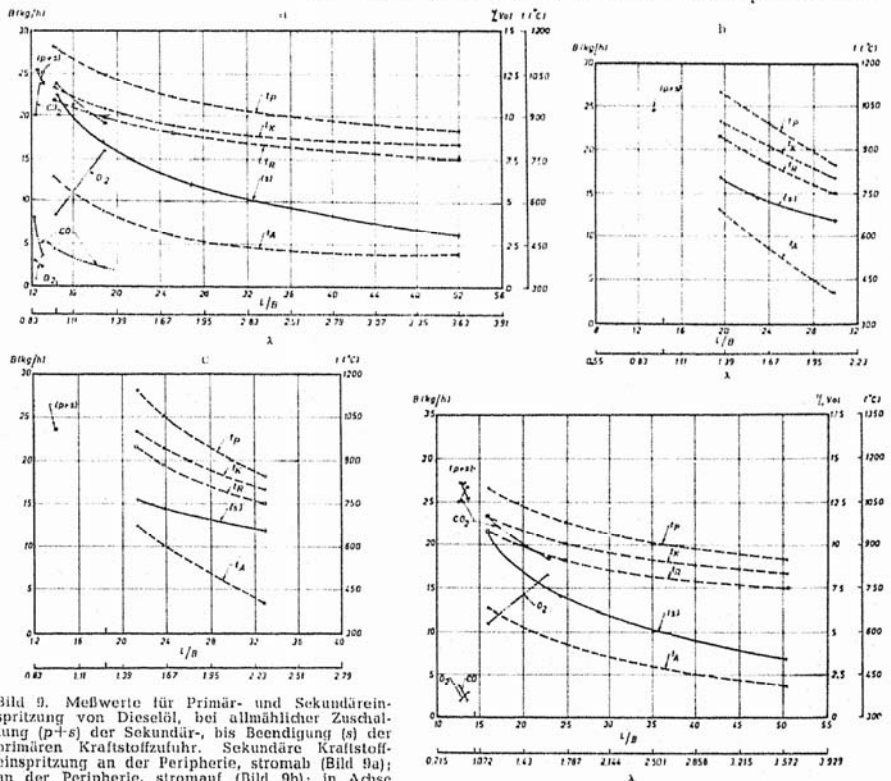


Bild 9. Meßwerte für Primär- und Sekundäreinspritzung von Dieselöl, bei allmählicher Zuschaltung (p+s) der Sekundär-, bis allmählicher Abschaltung (s) der primären Kraftstoffzufuhr. Sekundäre Kraftstoffeinspritzung an der Peripherie, stromab (Bild 9a); an der Peripherie, stromauf (Bild 9b); in Achse der Brennkammer (Bild 9c). Andere Bezeichnungen wie in Legende des Bildes 5.

Bild 10. Meßwerte erzielt wie in Bild 9, jedoch für Bunkeröl, mit Sekundäreinspritzung an der Peripherie, stromab

stoffzufuhr unterbrochen werden, doch traten bei vermehrter und bis auf ein Luft-Kraftstoff-Verhältnis von 20 verminderter Kraftstoffzuteilung dunkelrote Flammen und Rauch auf. Damit waren diese Anordnungen als ungeeignet erwiesen.

Der Luftdurchsatz war für den alleinigen Betrieb mit Sekundärkraftstoffeinspritzung mit der Anordnung dargestellt in Bild 9a — in den Abbildungen mit (s) gekennzeichnet — 5,3 kg je Minute, und 5,5 kg je Minute, mit den Anordnungen, dargestellt in den Abbildungen 9b und 9c.

Die Versuche wurden in gleicher Weise auch für vorgewärmtes Bunkeröl durchgeführt, wobei die Sekundäreinspritzung jedoch nur in der vorher gefundenen besten Anordnung an der Peripherie, stromab, erfolgte. Ihre Ergebnisse, dargestellt in Bild 10, decken sich mit den mit Dieselöl erzielten: Mit der primären und sekundären Einspritzung konnten Luft-Kraftstoff-Verhältnisse von 13,5 und 12,6 bei einem Sauerstoffgehalt von 1,5% und rauchfreiem Abgas erzielt werden. Bei Betrieb mit Sekundäreinspritzung allein (s) war der Luftdurchsatz 5,7 kg je Minute.

3.3 Stöchiometrischer Betrieb der Primärzone mit sekundärer Kraftstoffzufuhr

Während der im folgenden beschriebenen Versuche wurde die Primärzone zunächst mit Dieselöl und später mit Bunkeröl unter stöchiometrischen Bedingungen betrieben, wäh-

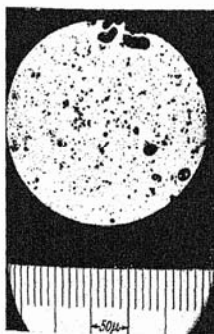


Bild 13. Rückstände von Bunkeröl bei Betrieb entspr. Bild 12.

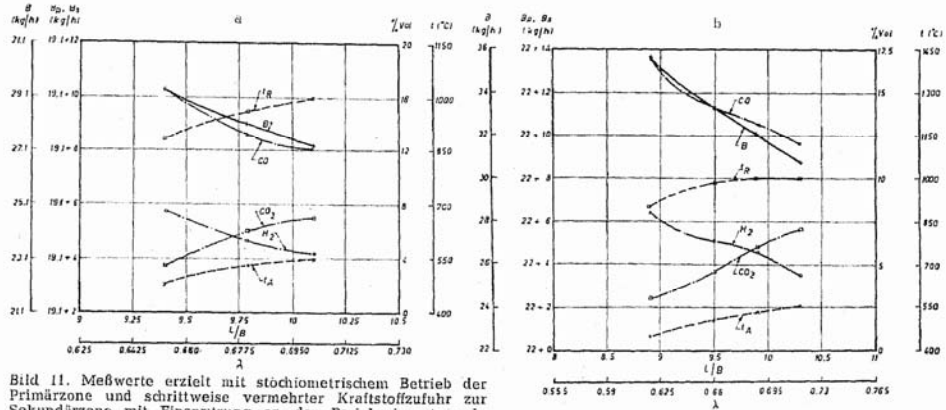


Bild 11. Meßwerte erzielt mit stöchiometrischem Betrieb der Primärzone und schrittweise vermehrter Kraftstoffzufuhr zur Sekundärzone mit Einspritzung an der Peripherie, stromab, für Dieselöl. Kraftstoffverbrauch der Primärzone: Bp, und der Sekundärzone: Bs. Luftdurchsatz 4,63 kg/min (Bild 11a) und 5,27 kg/min (Bild 11b)

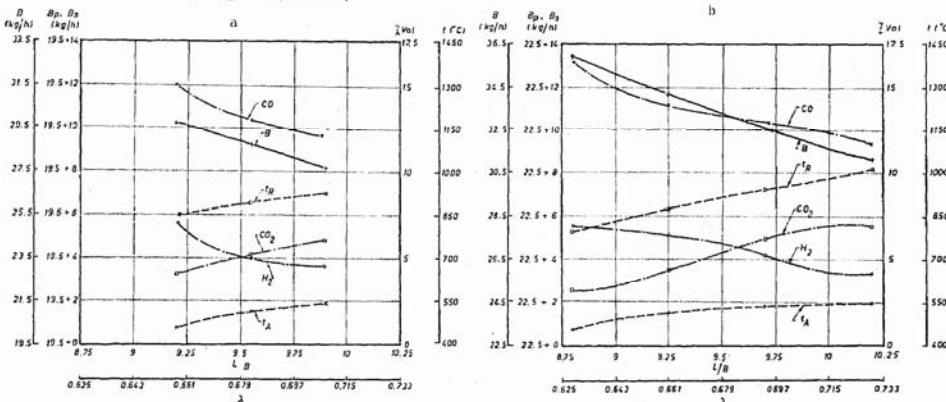


Bild 12. Meßwerte erzielt wie in Bild 11, jedoch mit Bunkeröl. Luftdurchsatz 4,63 (Bild 12a) und 5,27 kg/min (Bild 12b)

rend der Sekundärzone die jeweils gleichen Kraftstoffe in schrittweise zunehmender Menge zugeführt wurden, wobei die Einspritzung wieder von der Peripherie aus tangential in Richtung der Luftströmung erfolgte. Dabei wurde das Auftreten von Flammen und von Rauch am Ende der Abgasleitung als Beginn unzulässiger Betriebsverhältnisse angesehen.

Mit dieser Begrenzung konnte mit einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von 8,8, das einem Luftverhältnis von 0,64 entspricht, zufriedenstellender Betrieb erzielt werden. Die Analyse der Abgase erbrachte einen Gehalt von CO von 16 bis 17% und von H<sub>2</sub> von 7 bis 8%, während bei einem Gehalt von CO<sub>2</sub> von 3 bis 4% nur Spuren von Sauerstoff, unter 1%, gefunden wurden. Auf das Vorhandensein eines Reduktionsvorganges kann auf Grund der mit kleiner werdendem Luft-Kraftstoff-Verhältnis abfallenden Auslaßtemperatur — etwa von 500° C bei L/B = 10,1 auf 450° C bei L/B = 9,4 — geschlossen werden. Die an der Peripherie gemessenen Temperaturen blieben demgegenüber im wesentlichen konstant, womit wohl angezeigt ist, daß die Reduktion im konischen Teil der Kammer und stromab vor sich geht.

In den Bildern 11a und 11b sind die Meßwerte für Dieselöl, und in Bild 12a und 12b für Bunkeröl aufgetragen, wobei der Luftdurchfluß für die beiden erstgenannten Versuche jeweils 4,63 kg und für die letztgenannten jeweils 5,27 kg je Minute betrug. In dem Bild 13 ist noch die mikroskopische Aufnahme der Rückstände von Bunkeröl wiedergegeben, die durchschnittliche Größen von bis zu 10µ aufweist. Diese Teilchen sind wohl für die Entzündung und Flammenbildung in den Abgasen bei ihrer Berührung mit Außenluft verantwortlich zu machen.

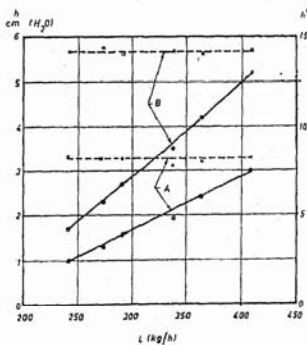


Bild 14. Druckverlust des Wirbelgebietes — A — und der Brennkammer — B — (linker Maßstab „h“) und Verhältnis von Druckverlust zu dynamischem Druck am Einlaß (rechter Maßstab, h') in Abhängigkeit vom Luftdurchsatz (L)

### 3.4 Messungen des Druckverlustes

Der Druckverlust wurde bei kalter Kammer einmal zwischen der Spirale und dem Ende des konischen Teiles der Kammer, also für das eigentliche Wirbelgebiet — Beziehung A — und zusätzlich zwischen dem Einlaß zur Brennkammer und dem Auslaß, also für die gesamte Anlage — Beziehung B — gemessen und ist in Bild 14 für verschiedene Luftmengen —  $L$  in  $\text{kg/h}$  — als statischer Druckabfall — in  $\text{cm H}_2\text{O}$  — und im Verhältnis zur dynamischen Druckhöhe der Luft am Eingang zur Kammer —  $h'$  — aufgetragen. Der Druckverlust steigt proportional mit dem Geschwindigkeitsdruck an und ihr Verhältnis ist demnach mit einem Wert von 8 für das Wirbelgebiet und für die gesamte Kammer von 14 unabhängig von ihm. Da ein Zusammenhang zwischen diesem Ergebnis und dem Exponenten der tangentialen Geschwindigkeit besteht [2], kann dieser mit etwa 0,7 für kalten, und mit etwa 0,65 für heißen Betrieb angenommen werden, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, daß die Kammer erheblichen Betriebsbelastungen ausgesetzt war.

#### 4. Betriebserfahrungen

Bild 15 läßt den Zustand der Ausmauerung, wie sie nach Beendigung der Versuche vorgefunden wurde, erkennen. Sie konnte nur Temperaturen von  $900\text{--}1000^\circ\text{C}$  widerstehen und demnach waren Beschädigungen zu erwarten. Die Abwesenheit von Verkokungen ist jedoch bemerkenswert. Wasserkühlung hat sich wesentlich besser bewährt als die zu Beginn vorgesehene Luftkühlung. Einspritzdüsen werden durch intensive Kühlung vor der Verkokung bewahrt.

#### 5. Schlußfolgerungen

Die Folgerungen, die aus den Versuchen gezogen werden können, sind wie folgt zusammenfaßbar:

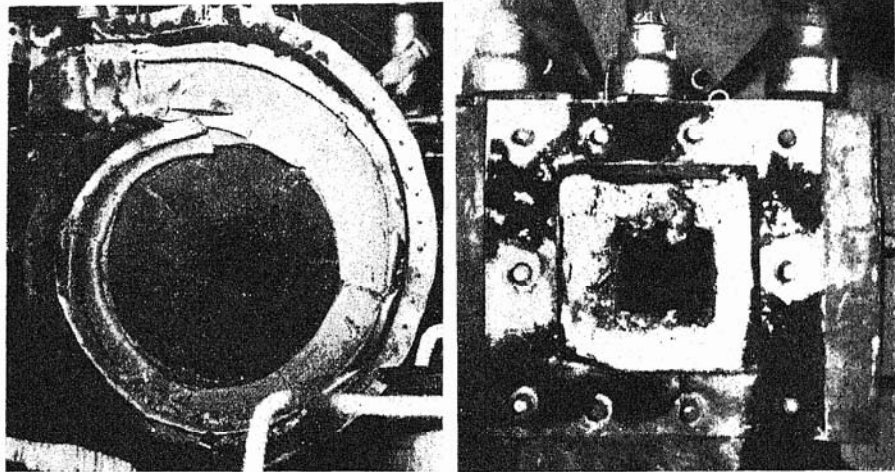


Bild 15. Ansichten der Ausmauerung nach den Versuchen

Schwere flüssige Kraftstoffe können selbst bei grober Zerstäubung in Wirbelkammern gut verbrannt werden, wobei besonders die Einspritzung von der Peripherie der Wirbelzone aus in Richtung der Gasbewegung günstig ist. Dabei ist eine Stabilisierung nicht notwendig, da der dann vorliegende Tropfenring verbrennungsunterhaltend wirkt. Begrenzt kann eine Vergasung durch Kraftstoffüberschuß erzwungen werden, doch ergeben sich versprechendere Verhältnisse, wenn bei stöchiometrischem Betrieb der Primärzone Kraftstoff zur Reduktion zusätzlich und in der oben erwähnten Weise eingespritzt wird. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten durch Anwendung auf Kohlenstaub- und auf Wasserdampf-, wenn nicht sogar Sauerstoffeinleitung, vertieft und geprüft werden. [5899]

#### Schrifttum

- [1] W. V. Battcock, T. F. Hurley u. R. G. Voysey: The use of solid fuel in the Gas Turbine, Inst. of Mech. Eng. u. ASME Joint Conf. on Comb., Sect. 5., 1955.
- [2] H. A. Havemann: A Theory of vortex combustion-chamber design, Part 1 Dez. 1953, Part 2 Jan. 1954, Journ. Inst. of Fuel, 26 u. 27.
- [3] Technical data on fuel, The British National Committee, World Conference, London, 1954. S. auch E. L. Bass, I. Lubbock u. C. G. Williams: The Gas Turbine and its fuels, Shell Aviation News Nr. 156, Jan. 1951.