

DK 662.612:536.46:533.6.011:666.1.031.24

## Modelluntersuchungen an U-Flammenwannen. Teil I: Strömungsverlauf und Stabilität<sup>\*)</sup>

VON RUDOLF BRÜNING, Karlsruhe

(Mitteilung aus dem Institut für Gastechnik, Feuerungstechnik und Wasserchemie der Universität Karlsruhe TH)

(Eingegangen am 6. März 1968)

Die vorliegenden Versuche gingen davon aus, daß zum Verständnis der Strömungsvorgänge in Umkehrflammen die bisher bekannten Ergebnisse und Berechnungsmethoden für Freistrah- und eingeschlossene rotationssymmetrische Flammen nicht ausreichen, da bei Umkehrflammen besondere Parameter, wie Mittenabstand der Brenner und Umlenkvorgang, einen entscheidenden Einfluß ausüben. Zur Untersuchung dieser Größen wurde ein kaltes Modell einer Glasschmelzwanne mit Umkehrflamme aufgebaut. Im vorliegenden ersten Teil einer Veröffentlichungsreihe wird über den Einfluß der Umlenkung auf den Strömungsverlauf und auf die Stabilität berichtet. Die Geschwindigkeits- und Druckverteilungen sowie Mischungsverlauf und Aufenthaltszeiten werden dann in den Teilen II und III erörtert werden.

Früher wurden Feuerräume von Industrieöfen allein auf Grund praktischer Erfahrungen und empirischer Formeln konstruiert. Eine exakte Berechnung des Strömungs- und Mischungsverlaufs, des Ausbrands und der Wärmeübertragung ist auch heute kaum möglich, obwohl inzwischen für viele dieser Probleme brauchbare Berechnungsmethoden, meist Näherungslösungen, entwickelt wurden.

Zur Untersuchung von Problemen, die auf mathematisch-analytischem Weg nicht zu lösen waren, führte RUMMEL [1] um 1930 die Modelltechnik im Industrieofenbau ein. Versuche an kalten Ofenmodellen gestatten, Strömungs- und Mischungsverhältnisse zu untersuchen. Ihre Ergebnisse geben Hinweise für den Entwurf neuer Anlagen und gestatten Voraussagen über deren Zweckmäßigkeit. Außerdem können durch Modellversuche bereits bestehende Großausführungen weiterentwickelt und verbessert werden. Man umgeht dabei die großen, betriebsbedingten Schwierigkeiten, welche bei Messungen an der Großausführung auftreten. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß bei Modellversuchen auf einfache Weise geometrische Veränderungen vorgenommen werden können, die an einer Großausführung während der Ofenreise nicht möglich sind. Außerdem ist der finanzielle Aufwand für Modellversuche in der Regel geringer als für Messungen an der Großausführung.

Die Frage, inwieweit Modellergebnisse mit Messungen an Großausführungen übereinstimmen, kann man auf Grund einer Arbeit von GÜNTHER und RENNER [2] beantworten, in welcher Messungen an einer Glasschmelzwanne und entsprechende Modellergebnisse wiedergegeben werden. Es zeigt sich, daß bei Einhaltung bestimmter Ähnlichkeitsbedingungen eine gute Übereinstimmung erreicht wird.

### 1. Großausführung, Ähnlichkeitsbedingungen, Modell

#### 1.1. Aufbau und Betriebsdaten der Großausführung

Die vorliegenden Untersuchungen gingen von einer Glasschmelzwanne mit Umkehrflamme aus, welche in

Bild 1 dargestellt ist. Die Zeichnung zeigt Schmelzwanne und Oberofen sowie die Anordnung der beiden Brennerschächte und des Einlegevorbaus. Die übrigen Bauteile der Großausführung, Durchlaß, Arbeitswanne und Regeneratoren wurden weggelassen, da sie für die vorliegenden Versuche keine Bedeutung haben. Die Wanne wurde mit Schweröl über zwei wassergekühlte Winkelzerstäuber beheizt. Diese wurden durch Bohrungen, welche senkrecht zur Brennerachse geführt sind, 790 mm hinter der Brennermündung so weit in den Brennerhals eingefahren, daß jede Düse in der Mitte der zugehörigen Brennerhälfte lag. Die für die Untersuchungen erforderlichen Betriebsdaten sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

<sup>\*)</sup> Auszug aus der von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe TH genehmigten Dissertation des Verfassers.

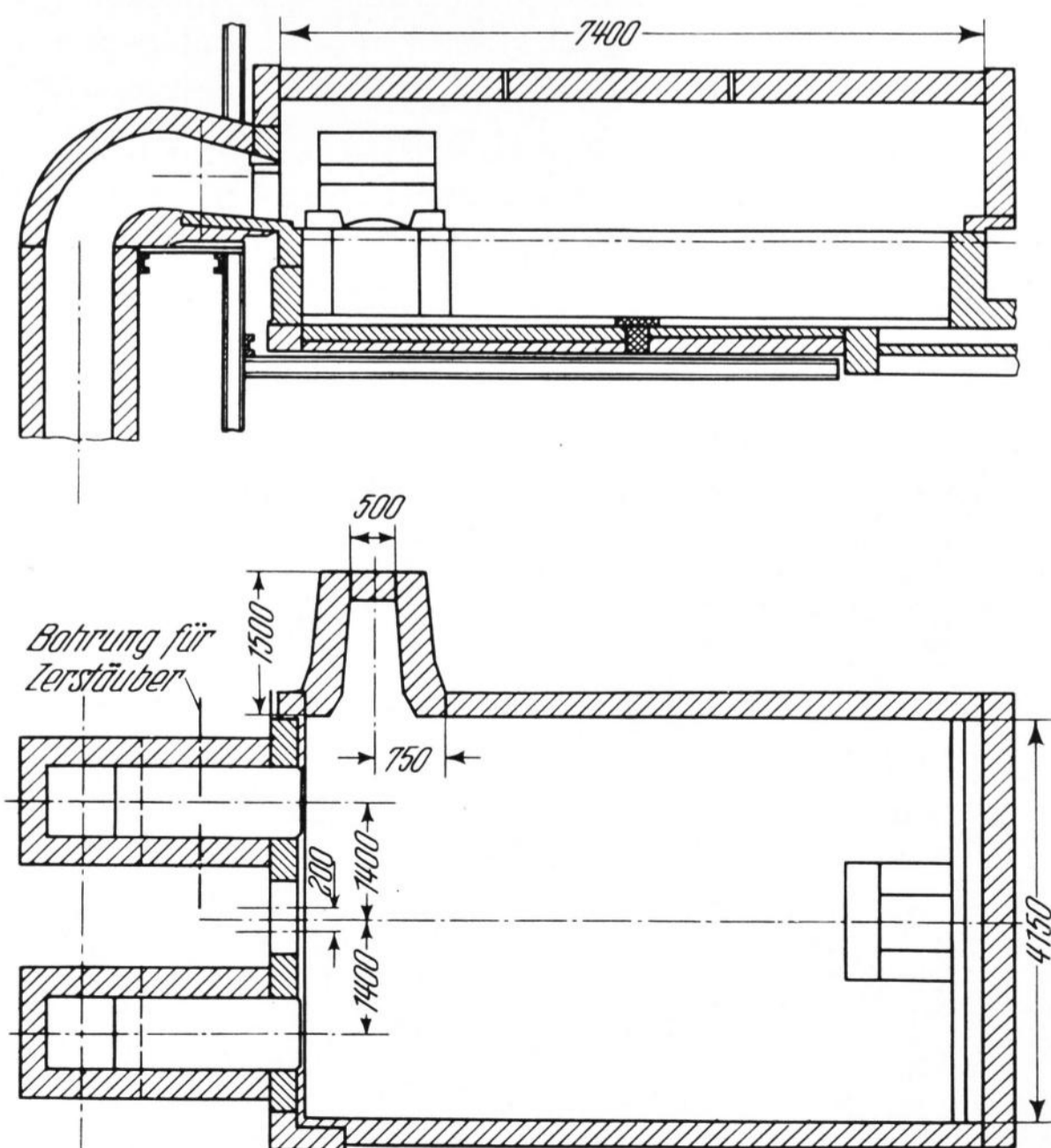


Bild 1. Maßzeichnung der Großausführung.

Tabelle 1. Betriebsdaten der Großausführung

Brennstoffdurchsatz	400 kp/h Schweröl
Zerstäuberluftanteil	3% der Verbrennungsluft
Luftzahl	$\lambda = 1,2$
Hydraulischer Durchmesser des Brenners	$D_H = 0,73 \text{ m}$
Brennerquerschnitt	$F_{2Gr} = 0,52 \text{ m}^2$
Austrittsquerschnitt eines Zerstäubers	$F_{1Gr} = 1,766 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Reynolds-Zahl im Brennerquerschnitt	$Re = 54000$
Impuls des Sekundärstrahls	$I_2 = 2,31 \text{ kp}$
Impuls der Primärstrahlen	$I_1 = 2,08 \text{ kp}$
Impulsverhältnis	$I_2/I_1 = 1,11$

## 1.2. Ähnlichkeitsbedingungen

In einem Modellversuch wird der zu untersuchende physikalische Vorgang so nachgeahmt, daß die gleichen Kennzahlen gelten wie für die Großausführung, damit sich die Modellergebnisse auf diese übertragen lassen. Zur exakten Nachahmung sind folgende Bedingungen zu beachten: 1. die geometrische Ähnlichkeit, 2. das Ähnlichkeitsgesetz nach REYNOLDS, 3. die kinematische und dynamische Ähnlichkeit und 4. die thermische Ähnlichkeit.

Bei kalten Modellversuchen ist die Einhaltung der thermischen Ähnlichkeit nicht beabsichtigt. Somit ist zunächst die geometrische Ähnlichkeit durch maßstabgetreuen Nachbau des Modells zu wahren, und es verbleiben dann noch die Bedingungen:

$$\begin{aligned}
 Re_M &= Re_{Gr} , \\
 \left( \frac{m_{Br}}{m_L} \right)_M &= \left( \frac{m_{Br}}{m_L} \right)_{Gr} , \\
 \left( \frac{\rho_{Br}}{\rho_L} \right)_M &= \left( \frac{\rho_{Br}}{\rho_L} \right)_{Gr} , \\
 \left( \frac{\bar{u}_{Br}}{\bar{u}_L} \right)_M &= \left( \frac{\bar{u}_{Br}}{\bar{u}_L} \right)_{Gr} .
 \end{aligned} \quad (1)$$

Man erkennt sofort, daß bei kalten Modellversuchen mit dem Strömungsmedium Luft nicht alle Bedingungen gleichzeitig eingehalten werden können. Bei den vorliegenden Versuchen wurde neben der geometrischen Ähnlichkeit das Ähnlichkeitsgesetz nach REYNOLDS beachtet, weil der nachzubildende Strömungsvorgang maßgeblich durch Massen- und Zähigkeitskräfte bestimmt wird. Da der Mischungsverlauf außerdem noch

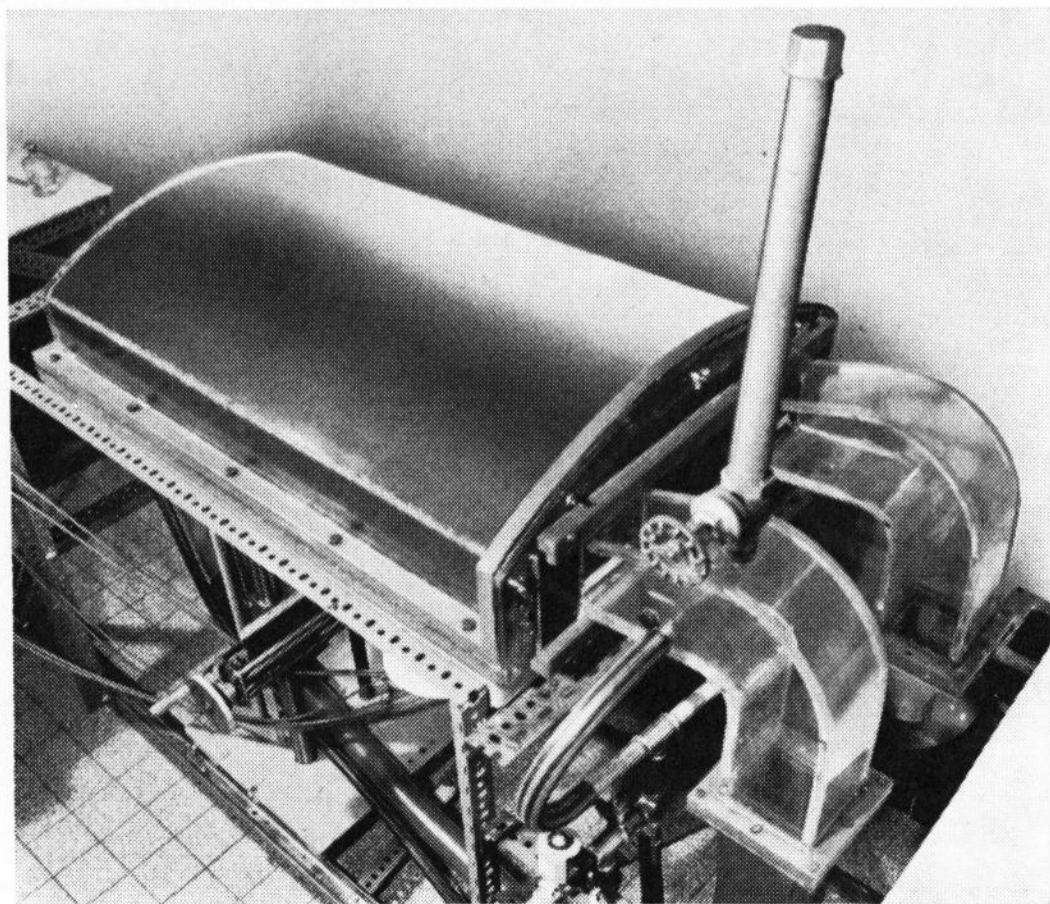


Bild 2. Grundaufbau des Modells.

wesentlich von dem Verhältnis Sekundär- zu Primärimpuls abhängt, wurde bei den Modellversuchen auch das Impulsverhältnis der Großausführung gewahrt. Die Einstellung dieser Größe ist bei kalten Modellversuchen nach Festlegung des Modellmaßstabs und der Reynolds-Zahl nur durch eine entsprechende Aufteilung des Gesamtvolumenstroms in Primär- und Sekundärstrom möglich.

## 1.3. Grundform des Modells

Das Modell wurde im Maßstab 1:8 geometrisch ähnlich zu der in Abschnitt 2.1. beschriebenen Großausführung gebaut (Bild 2). Nachgebildet wurden der Oberofen und die Hälse der beiden Brenner. An die Stelle des Glasspiegels tritt die Bodenplatte des Modells.

Die Gemengesicht auf dem Glasspiegel wurde weggelassen, da sie vergleichsweise sehr dünn ist und darüber hinaus wegen ihrer ungleichmäßigen Geometrie eine systematische Untersuchung erschwert. Ferner wurde für die hier beschriebene systematische Untersuchung der Einlegevorbau weggelassen, weil er den Strömungsverlauf sehr kompliziert. Um diesen beobachten zu können, sind Haube und Brennerhäse aus Plexiglas gefertigt. Für die übrigen Teile wurde PVC verwendet.

Im einziehenden Brenner sind, etwas in den Brennerhals zurückgesetzt, zwei zueinander parallele Rohre mit einem Innendurchmesser von 4 mm unter einem Neigungswinkel von 6° zur Bodenplatte hin zur Nachahmung der beiden Ölzerstäuber angebracht.

Haube, Brenner und Boden des Modells sind miteinander verschraubt, so daß an der Grundaufbau durch Auswechseln dieser Teile leicht geometrische Veränderungen vorgenommen werden können. Zum Einfahren der Meßsonden wurden 13 Schlitze parallel zur Stirnwand in den Modellboden eingefräst und mit Profilmileisten abgedichtet.

## 1.4. Geometrische Variationen

Um außer der oben beschriebenen Grundaufbau auch den Einfluß geometrischer Veränderungen untersuchen zu können, wurde das Modell konstruktiv so gestaltet, daß folgende geometrische Variationen möglich waren:

a) Der Abstand der Brennerachse war von 280 bis 400 mm stufenlos verstellbar (entsprechend 2240 bis 3200 mm der Großausführung).

b) Es konnten parallele oder gegen die Ofenachse geneigte Brenner (Winkel gegen die Ofenachse 10°) verwendet werden.

## 1.5. Betriebsdaten des Modells

Die Reynolds-Zahl an der Brennermündung der Großausführung betrug 54000. Da nach Untersuchungen von JOHNSTONE und THRING [3] und nach eigenen Vorversuchen bei dieser Größenordnung eine deutliche Verminderung der Reynolds-Zahl ohne wesentliche Beeinflussung des Strömungsverlaufs möglich ist, wurde aus versuchstechnischen Gründen im Modell eine Reynolds-Zahl von 30000 gewählt.

Das für die Großausführung berechnete Impulsverhältnis  $I_2/I_1 = 1,11$  wurde für die Modellversuche auf 1,15 aufgerundet. Diesen Wert erhielt man im Modell bei einem Primärvolumenstrom von 7,0 m<sup>3</sup>/h und einem

Sekundärstrom von  $138,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , wobei der Primärstrom  $18,5 \text{ p}$  und der Sekundärstrom  $21,4 \text{ p}$  betragen.

Da bei dem Betrieb der Großausführung ziemlich starke Impulsänderungen auftreten können, wenn man z. B. bei gleichem Brennstoffdurchsatz den Zerstäuberluftanteil auf  $4\%$  steigert oder die Luftzahl verändert oder gar von Öl auf Gas umstellt, wurde durch Variation des Impulsverhältnisses auf  $0,6$  bzw.  $1,7$  der Einfluß dieser Größe auf den Strömungsverlauf untersucht. Die Variation der Impulsverhältnisse wurde ziemlich groß gewählt, um deren Einfluß deutlich herauszustellen.

## 2. Meßverfahren und Versuchsanlage

### 2.1. Sichtbarmachung des Strömungsfeldes

Zur Sichtbarmachung des Strömungsverlaufs wurden verschiedene Verfahren angewendet. Zunächst kann man durch Zumischen kleiner Styroporflocken von etwa  $1$  bis  $3 \text{ mm}$  Korndurchmesser den Strömungsverlauf sichtbar machen und die Stabilitätsgrenzen der Umkehrströmung bestimmen. Um den Einfluß des Strahlimpulses und des Brennerabstands auf den Strömungsverlauf festzuhalten, werden mit einer Kleinbildkamera Strömungsbilder nach dem Lichtschnittverfahren aufgenommen. Bei dieser Versuchstechnik werden mit einer Quecksilberdampfampe, welche durch eine vorgeschaltete Zylinderlinse ein annähernd paralleles Licht liefert, etwa  $15 \text{ mm}$  dicke Lichtschnittebenen ausgeleuchtet.

Um die Stabilitätsgrenzen des Umkehrstrahls in Abhängigkeit von Brennerabstand und Strahlimpuls zu bestimmen, wurde wie folgt vorgegangen: Man stellt zunächst einen hohen Strahlimpuls und den größtmöglichen Brennerabstand von  $400 \text{ mm}$  ein (entsprechend  $3200 \text{ mm}$  der Großausführung), wobei sich eine stabile Umkehrströmung ergibt. Sodann wird der Mittenabstand der Brenner so lange verkleinert, bis ein leichtes Flackern des ein- bzw. austretenden Strahls auftritt, d. h. die Grenze des Übergangsbereichs zwischen stabiler und instabiler Strömung erreicht ist. Bei einer weiteren Verminderung des Brennerabstands wird der Strömungsverlauf schließlich vollends instabil. Der eintretende Strahl pendelt zwischen Außenwand und Modellachse hin und her, und die Umkehrzone verändert ständig ihre Lage. Diese beiden Grenzwerte werden in einem Diagramm in Abhängigkeit von Brennerabstand und Strahlimpuls registriert.

Während die eingangs beschriebene Methode des Zumischens kleiner Schwebeteilchen einen Gesamtüberblick lieferte, erhielt man die Strömungsrichtung an einzelnen genau fixierten Punkten, indem man einen Wollfaden an die betreffende Stelle bringt, bzw. der Strömung Rauch zumischt. Ein besonderer Vorteil der Wollfadenmethode liegt darin, daß man durch eine längere Beobachtung kurzzeitige Richtungsschwankungen ausscheiden kann. Untersucht man punktweise das gesamte Strömungsfeld und zeichnet jeweils die Strömungsrichtung auf, so erhält man mit einiger Erfahrung Skizzen, nach denen dann anschauliche Bilder des Strömungsverlaufs gezeichnet werden. Diese Strömungsbilder werden neben den Lichtschnittbildern zur Beschreibung des Strömungsverlaufs herangezogen.

### 2.2. Aufbau der Versuchsanlage

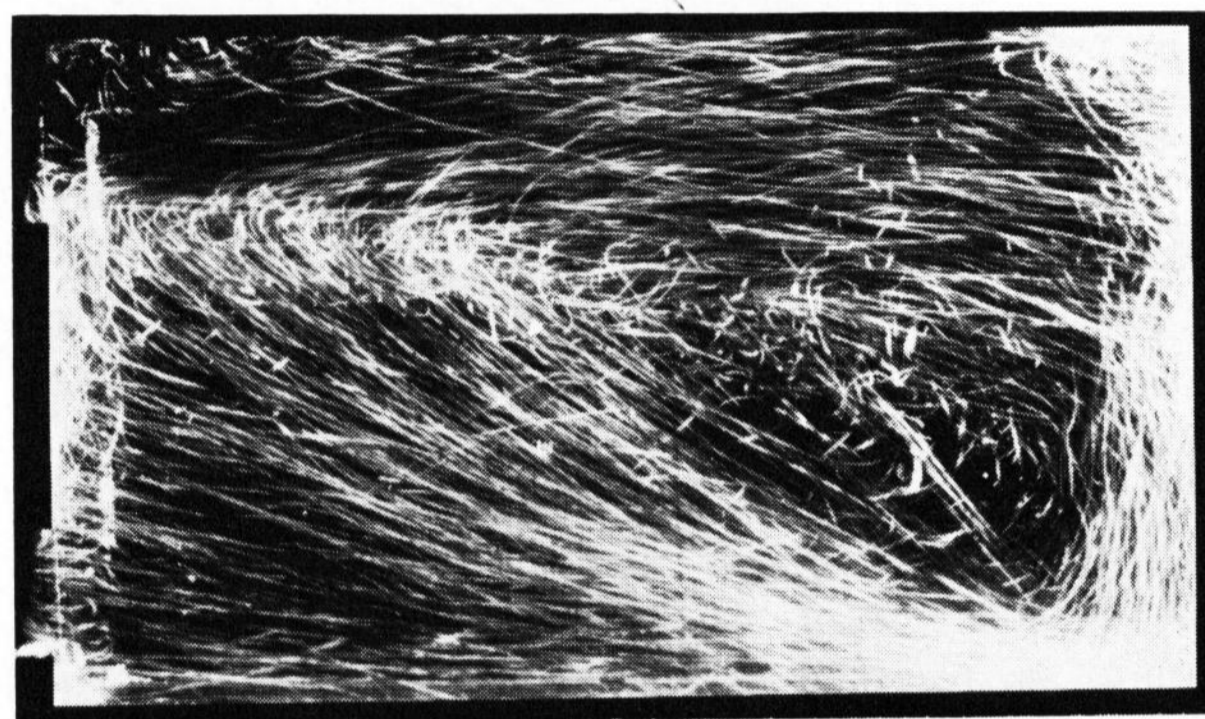
Für die Förderung des primären Öl-Zerstäuberluftstrahls und des sekundären Verbrennungsluftstroms

standen zwei Gebläse zur Verfügung. Um Krümmereffekte der flexiblen Zuleitung des Sekundärstroms zum Modell auszuschalten und eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung vor dem Brennerkrümmer zu erreichen, wurde im Brennerschacht ein Strömungsgleichrichter eingebaut. Beide Volumenströme wurden mit Blenden gemessen und mit Drosselventilen bzw. Abblasehähnen geregelt. Die Styroporflocken wurden aus einem Vorratsbehälter durch eine Öffnung im Gewölbe des einziehenden Brenners zugegeben und mit Hilfe eines Filters am Ende des abziehenden Brenners zurückgewonnen.

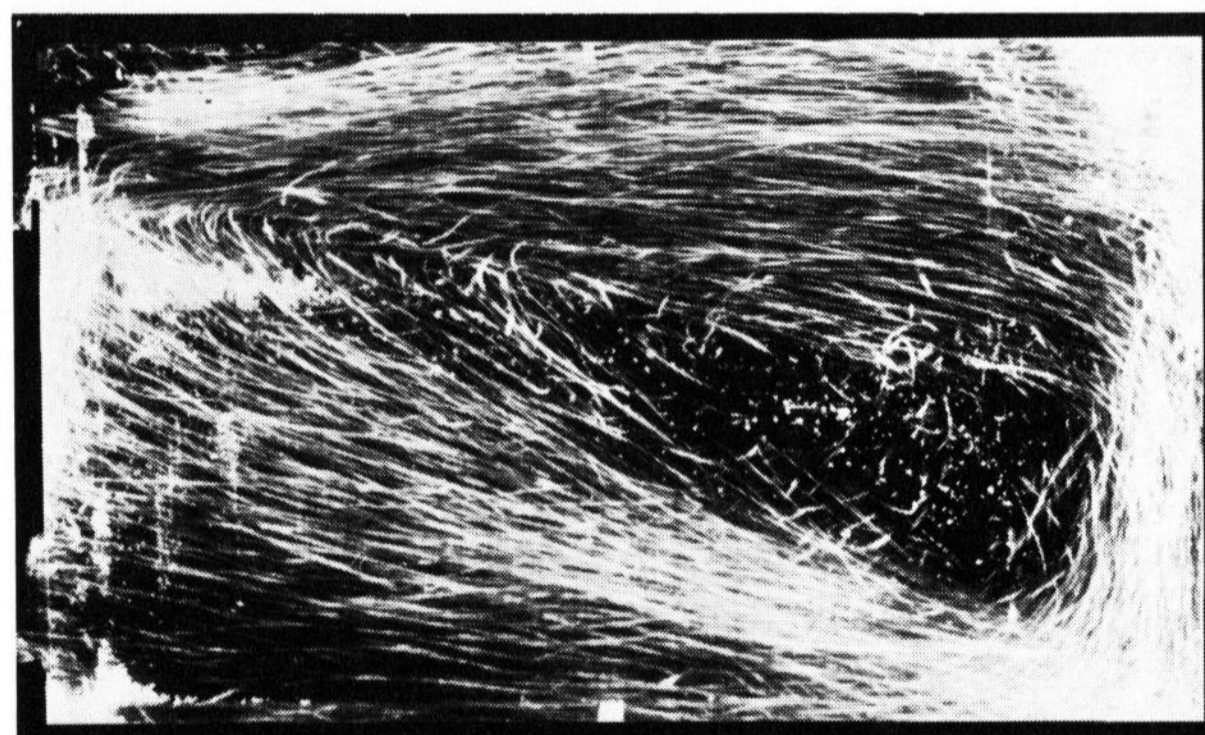
## 3. Versuchsergebnisse

### 3.1. Vorversuche

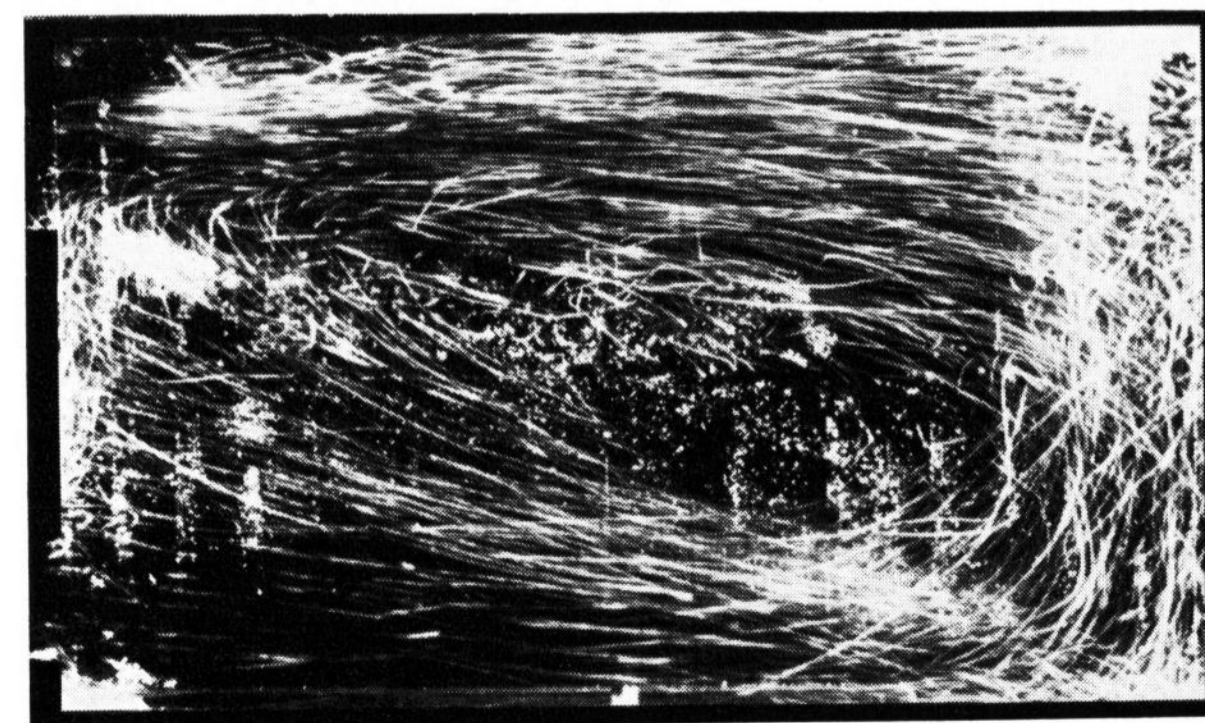
Zunächst wurde überprüft, inwieweit der Strömungsverlauf vom statischen Druck am abziehenden Brenner beeinflußt wird, der mit Hilfe eines Injektors in der Abluftleitung abgesenkt werden konnte. Es zeigte sich,



a)

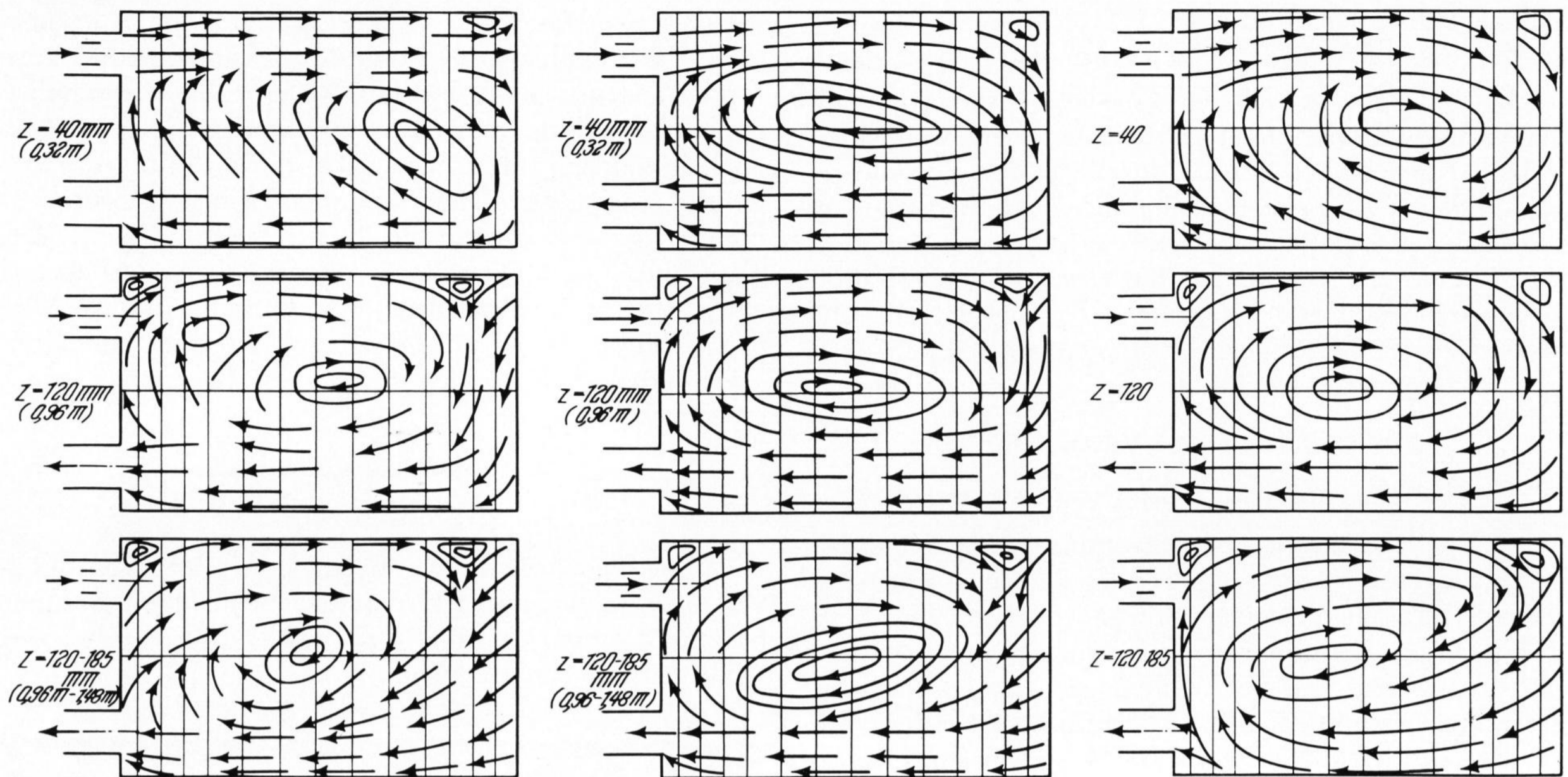


b)



c)

Bilder 3a bis c. Strömungsverlauf bei parallelen Brennern,  
a) Brennerabstand  $350 \text{ mm}$  ( $2,80 \text{ m}$ ), Impulsverhältnis  $0,6$ ,  
b) Brennerabstand  $350 \text{ mm}$  ( $2,80 \text{ m}$ ), Impulsverhältnis  $1,15$ ,  
c) Brennerabstand  $350 \text{ mm}$  ( $2,80 \text{ m}$ ), Impulsverhältnis  $1,70$ .  
(In Klammern stehen die entsprechenden Maße der Großausführung.)



Bilder 4a bis c. Strömungsverlauf bei parallelen Brennern  
(schematische Darstellung),

- a) Brennerabstand 350 mm (2,80 m), Impulsverhältnis 0,6, b) Brennerabstand 350 mm (2,80 m), Impulsverhältnis 1,15,  
c) Brennerabstand 350 mm (2,80 m), Impulsverhältnis 1,70.  
(In Klammern stehen die entsprechenden Maße der Großausführung.)

daß der Abfall des statischen Drucks zwischen Brenner und abziehendem Brenner bei gleicher Einstellung konstant blieb. Eine Untersuchung des Strömungsverlaufs sowohl an Hand des Lichtschnittverfahrens als auch an Hand der Wollfadenmethode ergab bei verschiedenen statischen Drücken am abziehenden Brenner das gleiche Strömungsbild, wie es in Anbetracht der Tatsache, daß das Druckgefälle konstant blieb, zu erwarten war. Daher konnte bei den Messungen auf die Einstellung eines konstanten statischen Drucks im Modellraum verzichtet werden.

### 3.2. Strömungsverlauf bei parallelen Brennern

Den Strömungsverlauf in der Grundausführung bei den Impulsverhältnissen 0,6; 1,15 und 1,7 und dem Brennerabstand 350 mm (entsprechend 2800 mm der Großausführung) zeigen die Bilder 3a bis c. Die schematischen Bilder des Strömungsverlaufs, welche nach der Wollfadenmethode gewonnen wurden, sind für die gleichen Einstellungen in den Bildern 4a bis c dargestellt. Diese zeigen jeweils zwei waagerechte Schnittebenen bei den Höhenlagen  $Z = 40$  mm und 120 mm (entsprechend 320 und 960 mm der Großausführung) über dem Glaspiegel sowie den Strömungsverlauf 5 mm unter dem Gewölbe. Man erkennt deutlich die gute Übereinstimmung mit den Fotografien.

Zunächst wird der zentrale Fall besprochen, der dem Strömungsverlauf in der Großausführung entspricht und in den Bildern 3b und 4b dargestellt ist. Er wird in dem Modell bei einem Impulsverhältnis von 1,15 und einem Brennerabstand von 350 mm (entsprechend 2800 mm in der Großausführung) nachgebildet. Die durch den Brenner in das Modell eintretende Luft strömt auf einer leicht gekrümmten Bahn zur Rückwand. Auf diese auftreffend, fließt der Volumenstrom nach allen Seiten auseinander. Es bildet sich ein Strömungsverlauf aus, wie

er für die räumliche Staupunktströmung bekannt ist. Allerdings ist der vorliegende Fall nicht rotationssymmetrisch, da der Volumenstrom in erster Linie nur zur Modellachse und unter das Gewölbe abfließen kann. Eine Umlenkung zur Außenwand oder zum Boden hin ist nur in mehr oder weniger begrenztem Umfang möglich. Die zur Modellachse und unter das Gewölbe abfließenden Volumenanteile werden nochmals umgelenkt und fließen dann, zu einem Volumenstrom vereint, zum abziehenden Brenner, wobei ein Teil vom Brennerstrahl wieder zur Modellrückwand mitgerissen wird.

Zwischen Vor- und Rückstrom entsteht ein großer Wirbel, dessen Hauptachse in der Höhe  $Z = 40$  mm (entsprechend 320 mm der Großausführung) nicht parallel, sondern leicht geneigt zur Modellachse verläuft. In der Höhe  $Z = 120$  mm (960 mm) hat sich die Achse des Wirbels parallel zur Modellachse ausgerichtet, wogegen sie unter der Haube vom abziehenden Brenner diagonal durch das Modell verläuft. Die Neigung der Wirbelhauptachse in der Höhe  $Z = 40$  mm (320 mm) ergibt sich aus der Lage und Breite des Brennerstrahls. Dieser ist beim Eintritt in das Modell relativ schmal, so daß Wirbelgebiet und Rückstromzone bis in die Nähe des Brenners reichen. Auf dem Weg zur Modellrückwand reißt er infolge seines Impulses Teile der Rückströmung mit sich, wodurch eine Strahlausbreitung eintritt und das Wirbelgebiet zur Rückstromseite abgedrängt wird. Da die Strahlachse in der Nähe des Modellbodens liegt, sind die Strömungsgeschwindigkeiten in der Höhe  $Z = 120$  mm (entsprechend 960 mm der Großausführung) relativ niedrig. Daher lenken die in dieser Höhe fließenden Anteile des Vorstroms infolge ihres relativ geringen Impulses die Rückströmung nicht mehr merklich zur Brennerseite ab, so daß die Wirbelhauptachse parallel zur Modellachse liegt. Unter dem Gewölbe wird in der Nähe der Rückwand infolge der

Bild 5. Abstand der Wirbelzentren von dem Brenner bei der Grundausführung.

Es sind:  $l$  = Abstand des Wirbelmittelpunktes vom Brenner,  
 $L$  = Modelllänge,  
 $BA$  = Brennerabstand,  
 $B_M$  = Modellbreite.

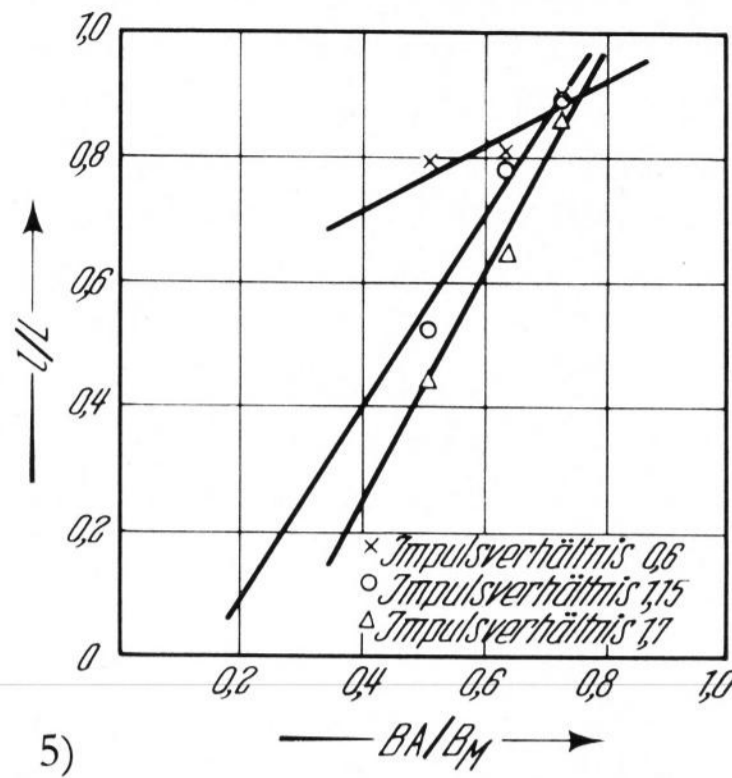
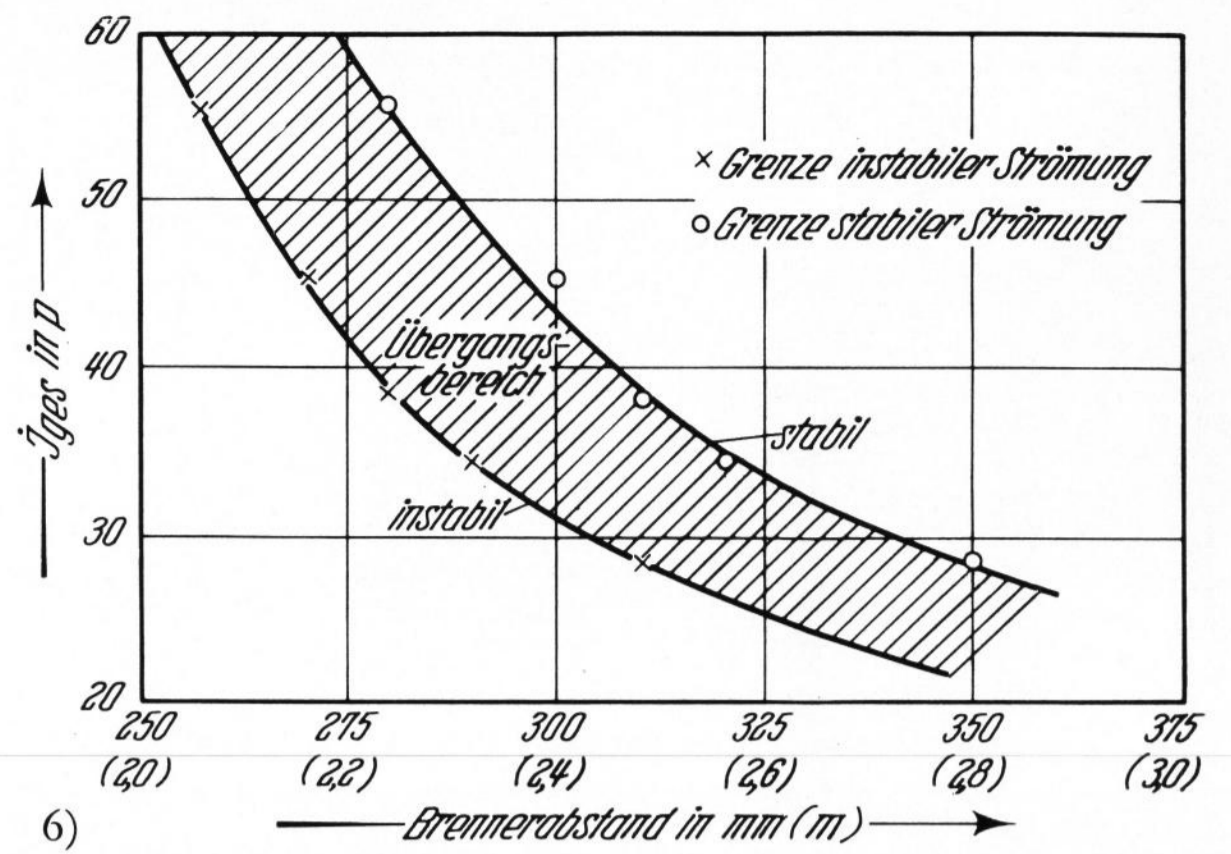


Bild 6. Stabilitätsbereich der Umkehrströmung bei parallelen Brennern. 5)



Umlenkung die gesamte Modellbreite von der Rückströmung eingenommen. Diese wird dann auf dem Weg zum abziehenden Brenner von der Vorströmung abgedrängt.

Variiert man das Impulsverhältnis von 1,15 auf 1,7, so ergibt sich der in den Bildern 3c und 4c dargestellte Strömungsverlauf. Das Totwassergebiet um das Zentrum des Hauptwirbels wird etwas größer als in dem oben beschriebenen Fall, da der eintretende Strahl infolge seines geringen Impulses nur in der Nähe der Stirnwand einen Teil des abziehenden Volumenstroms mitreißt. Bei dem Impulsverhältnis 1,15 dagegen wird der Rückstrom auf der Auslaßseite früher zum Brenner hin abgelenkt und das Totwassergebiet verkleinert. Die Lage der Hauptachse des großen Wirbels entspricht annähernd der, welche bei dem oben besprochenen zentralen Fall gefunden wurde. Geringfügige Unterschiede erscheinen in Anbetracht der subjektiven Untersuchungsmethode bedeutungslos.

Bei dem Impulsverhältnis 0,6 (Bilder 3a und 4a) bildet sich dagegen ein anderer Strömungsverlauf aus. Man erkennt, daß der in das Modell eintretende Volumenstrom bei  $Z = 40$  mm (320 mm) nicht mehr auf einer leicht gekrümmten Bahn, sondern durch den hohen Primärimpuls gerade bis zur Rückwand fließt. Der Hauptwirbel ist hier kleiner und liegt in der Höhe  $Z = 40$  mm stromabwärts verschoben in der hinteren Modellhälfte. Seine Hauptachse ist stärker gegen die Modellachse geneigt als bei den anderen Impulsverhältnissen, bei denen dieser Neigungswinkel annähernd gleich ist. Die größere Neigung und Verlagerung des Wirbelzentrums werden durch den hohen Impuls des Strahls verursacht, der bis in die Nähe der Modellrückwand Rückstromsubstanz mitreißt, wodurch das Maximum des Volumenstroms auf der Brennerseite, welches mit der Lage des Wirbelzentrums übereinstimmt, erst in der Nähe der Rückwand erreicht wird. Ferner erkennt man, daß das Totwassergebiet um das Zentrum des Hauptwirbels im Vergleich zu den beiden anderen Impulsverhältnissen durch den hohen Strahlimpuls stark verkleinert wird.

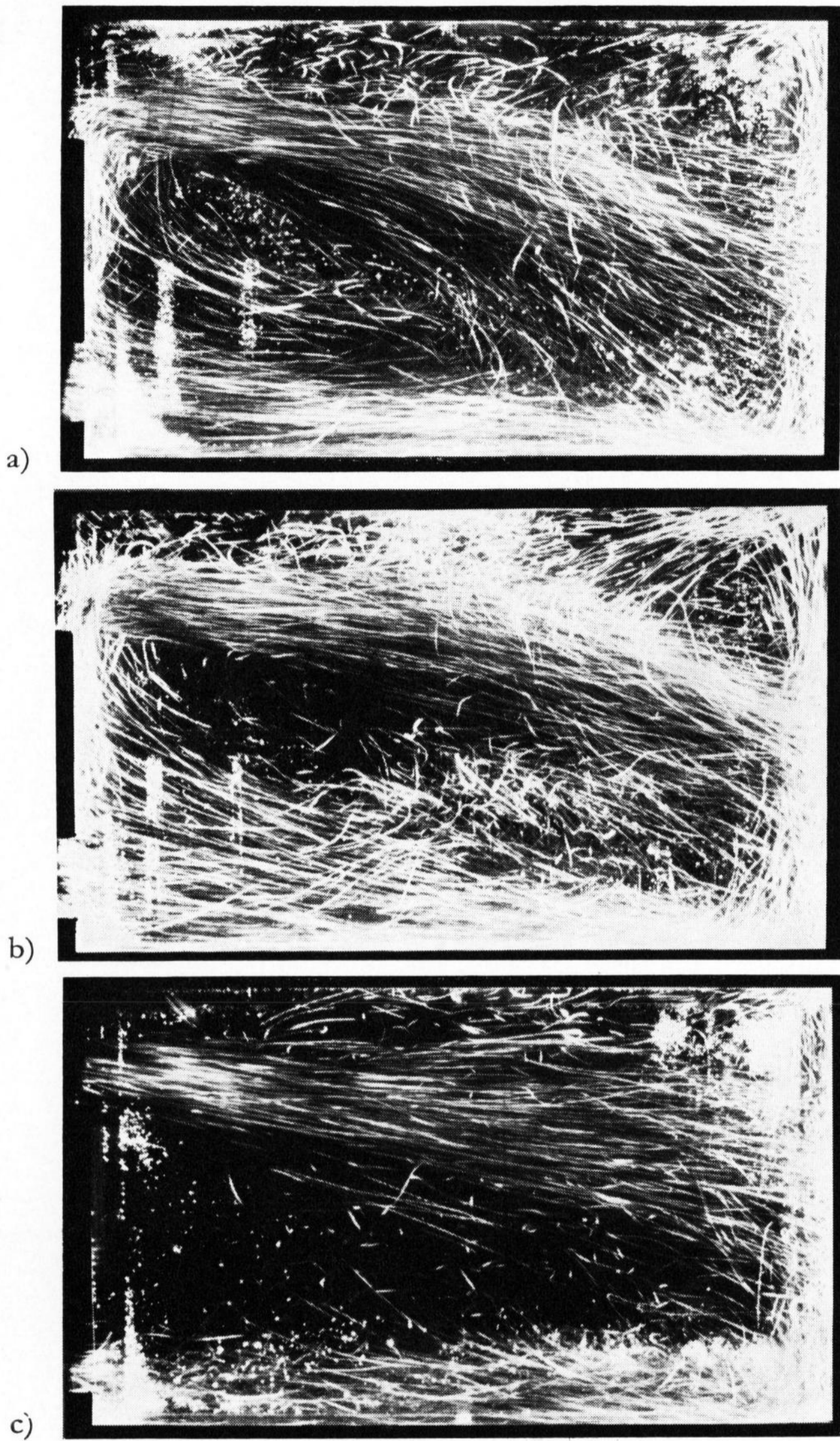
Der Strömungsverlauf wurde weiterhin bei den oben genannten Impulsverhältnissen und den Brennerabständen 280 und 400 mm (entsprechend 2240 und 3200 mm der Großausführung) bestimmt. Das Zentrum des Hauptwirbels wird bei einer Verminderung des Brennerabstands von 350 und 280 mm bei allen Impulsverhältnissen stromaufwärts zur Stirnwand hin verlagert. Die Strömungsquerschnitte des ein- und des austretenden

Strahls werden etwas breiter. Bei einer Vergrößerung des Brennerabstands von 350 auf 400 mm (entsprechend 3200 mm der Großausführung) wird das Hauptwirbelzentrum dagegen stromabwärts und unter der Haube außerdem auf die Brennerseite verlagert, wogegen es bei einem Brennerabstand von 350 mm stets etwa auf der Modellachse liegt. Der Strömungsquerschnitt des eintretenden Strahls nimmt etwas ab, und die Umkehrzone vor der Rückwand wird dünner, d. h. der Strahl liegt sehr lange an der Außenwand an, während der Strömungsquerschnitt des abziehenden Strahls nach vorne stärker zunimmt. In Bild 5 ist die Lage der Wirbelzentren mit Hilfe dimensionsloser Größen dargestellt. Bei den Impulsverhältnissen 1,15 und 1,7 erkennt man eine nahezu lineare Abhängigkeit von dem Brennerabstand. Eine Bestimmung der Funktion ist jedoch in Anbetracht des subjektiven Meßverfahrens nicht gerechtfertigt. Bei dem Strahl mit dem höchsten Impuls ist der Einfluß des Brennerabstands wesentlich geringer. Es zeigt sich ein dominierender Einfluß des Impulses auf den Strömungsverlauf.

### 3.3. Instabilität bei parallelen Brennern

Bei den Impulsverhältnissen 1,15 und 1,7 wurde bei einer Verkleinerung des Brennerabstands von 350 auf 280 mm (entsprechend 2240 mm der Großausführung) der Strömungsverlauf instabil, vor allem bei dem letzteren Impulsverhältnis wird ein Pendeln des eintretenden Volumenstroms beobachtet, wogegen bei einem solchen von 0,6 die Strömung selbst bei einem Brennerabstand von 280 mm stabil ist.

Bei instabiler Strömung neigt sich die normalerweise vom Brenner annähernd gerade zur Modellrückwand verlaufende Strahlachse zuweilen zur gegenüberliegenden Außenwand. Auf beiden Seiten des Strahls entstehen so große Rückstromwirbel, daß das Strömungsbild eine gewisse Ähnlichkeit mit einer Acht aufweist. Die Umkehrzone verlagert sich ständig zwischen Rückwand und Modellmitte. Für dieses Verhalten kann folgende Modellvorstellung entwickelt werden: Bei kleinem Impuls oder Brennerabstand wird der eintretende Strahl durch das Druckgefälle zwischen Brenner und Abzug zur Auslaßseite abgelenkt. Da er dann auch aus dem Bereich zur Außenwand hin Substanz mitreißt, wird dort der statische Druck abgesenkt, wodurch der Brennerstrahl wieder zur Außenwand umklappt. Hierdurch wird der vorher in diesem Bereich entstandene Unterdruck aufgefüllt, und das Druckgefälle zwischen Brenner und Abzug lenkt den eintretenden Brennstoffstrahl erneut zur Auslaßseite ab.



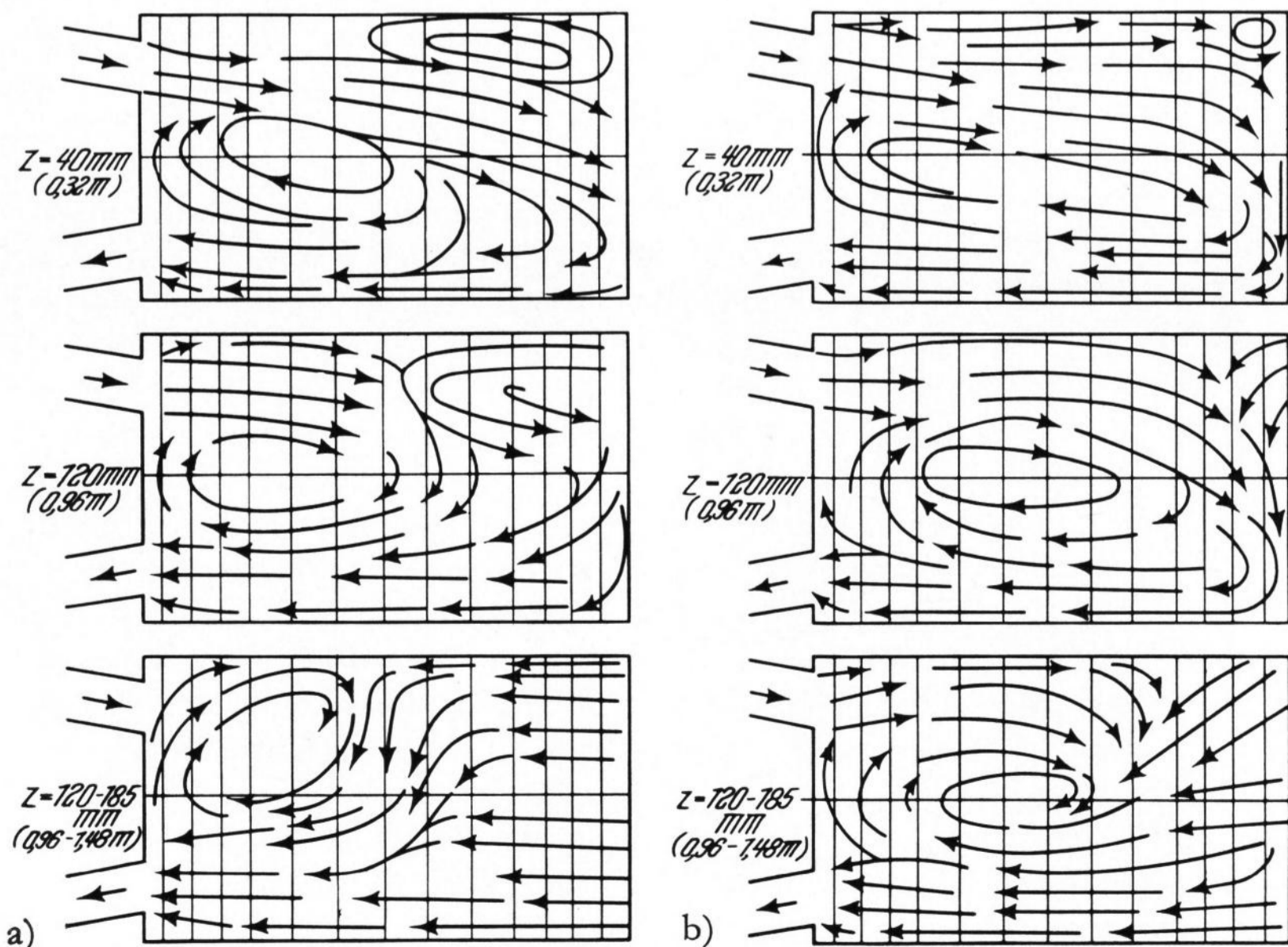
Bilder 7a bis c. Strömungsverlauf bei geneigten Brennern,  
 a) Brennerabstand 350 mm (2,80 m), Impulsverhältnis 0,6,  
 b) Brennerabstand 350 mm (2,80 m), Impulsverhältnis 1,15,  
 c) Brennerabstand 350 mm (2,80 m), Impulsverhältnis 1,70.  
 (In Klammern stehen die entsprechenden Maße der Großausführung.)

Vergrößert man den Brennerabstand von 350 auf 400 mm (entsprechend 3200 mm der Großausführung), tritt keine Instabilität mehr auf. Die Abhängigkeit der Strömungsstabilität von Strahlimpuls und Brennerabstand wurde mit Hilfe des in Abschnitt 2.1. beschriebenen Verfahrens eingehender untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt. Der Bereich instabiler Strömungen liegt für die Impulsverhältnisse 0,6; 1,15 und 1,7 bei Brennerabständen unter 260, 280 bzw. 290 mm. Eine stabile Umkehrströmung erhält man bei Brennerabständen über 280, 310 und 320 mm.

### 3.4. Strömungsverlauf bei geneigten Brennern

Ferner wurde der Strömungsverlauf mit gegen die Modellachse um  $10^\circ$  geneigten Brennern untersucht. Die Bilder 7a bis c zeigen den Strömungsverlauf bei den Impulsverhältnissen 0,6; 1,15 und 1,7 und dem Brennerabstand 350 mm (entsprechend 2800 mm der Großausführung). Die Bilder 8a und b geben die schematischen Strömungsbilder wieder, welche mit Hilfe der Wollfadennmethode für die Brennerabstände 350 und 400 mm (entsprechend 2800 und 3200 mm beim Ofen) bei dem Impulsverhältnis 1,15 aufgenommen wurden.

Nur bei einem Brennerabstand von 400 mm ergab sich bei allen Impulsverhältnissen eine stabile Umkehrströmung, ähnlich der bei parallelen Brennern. Der Strömungsquerschnitt des eintretenden Strahls und die Totwassergebiete werden größer als in der Grundausführung des Modells. Bei den Brennerabständen 350 und 280 mm zeigte sich dagegen ein anderer Strömungsverlauf. Der eintretende Volumenstrom fließt nicht mehr parallel zur Außenwand, sondern folgt seiner durch die Brennerneigung bedingten Anfangsrichtung. Die Strahlachse nähert sich mit wachsendem Abstand vom Brenner stetig der Modellachse. Sie trifft bei einem Brennerabstand von 350 mm (entsprechend 2800 mm in der Großausführung) in der Nähe der Modellachse, bei einem Brennerabstand von 280 mm (2240 mm) in der dem Brenner diagonal gegenüberliegenden Ecke auf die Modellrückwand. Der Strahlquerschnitt nimmt bis in die hintere Modellhälfte ständig zu und wird erheblich breiter als bei der Verwendung von parallelen Brennern, da die Strahlausbreitung nicht durch die Außenwand



Bilder 8a und b. Strömungsverlauf bei geneigten Brennern (schematische Darstellung),

- a) Brennerabstand 350 mm (2,80 m), Impulsverhältnis 1,15,
- b) Brennerabstand 400 mm (3,20 m), Impulsverhältnis 1,15.

(In Klammern stehen die entsprechenden Maße der Großausführung.)

behindert wird. Dabei entstehen auf beiden Seiten des Strahls große Rückstromwirbel. Die Totwassergebiete im Zentrum dieser Rückstromwirbel werden mit abnehmendem Impuls größer, ebenso die Kurzschlußströmungen.

Die Untersuchungsergebnisse in Bild 9 zeigen, daß die Stabilität der Strömung bei Verwendung der geneigten Brenner wesentlich vermindert wurde, da man nur bei einem Brennerabstand von 400 mm bei allen Impulsverhältnissen eine stabile Umkehrströmung erreicht. Bei den übrigen Brennerabständen, vor allem bei einem solchen von 280 mm, tritt bei kleinem Primärimpuls ein starkes Pendeln des Brennerstrahls auf. Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen bei parallelen Brennern, so zeigt es sich, daß einmal zur Erreichung eines stabilen Strömungszustandes ein größerer Brennerabstand erforderlich und andererseits der stabilisierende Einfluß des Strahlimpulses geringer ist.

#### 4. Zusammenfassung

Zunächst wurde der Strömungsverlauf bei Umkehrflammen, über den bisher nur unklare Vorstellungen bestanden, eindeutig beschrieben. Die Untersuchungen ergaben, daß Strahlbreite, Lage des Hauptwirbelzentrums und Stabilitätsgrenzen der Umkehrströmung vor allem von dem Mittenabstand der Brenner und dem Strahlimpuls abhängen. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Betrachtungen von STEIN [4] verwiesen. Die Einflüsse der oben genannten Parameter wurden in Diagrammen dargestellt, aus denen nunmehr die Stabilitätsgrenzen der Umkehrströmung bei anderen Impulsen oder Brennerabständen abgelesen werden können. Die Ergebnisse decken sich im wesentlichen mit denen von TERADA und WAKAMATSU [5], obgleich deren zweidimensionale Modelluntersuchungen den Strömungsverlauf nicht eindeutig wiedergeben.

- [1] RUMMEL, K.: Der Einfluß des Mischungsvorganges auf die Verbrennung von Gas und Luft in Feuerungen. Arch. Eisenhüttenwes. **10** (1936) S. 505—510, 541—548, **11** (1937) S. 19—30, 67—80, 113—123, 163—181, 215—224. [Ref. Glastechn. Ber. **16** (1938) S. 179.]
- [2] GÜNTHER, R. und RENNER, K.: Brenneruntersuchungen. Teil I bis IV. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 53—60, 97 bis 110, 386—407, **27** (1954) S. 192—198.
- [3] JOHNSTONE, R. E. und THRING, M. W.: Pilot plants,

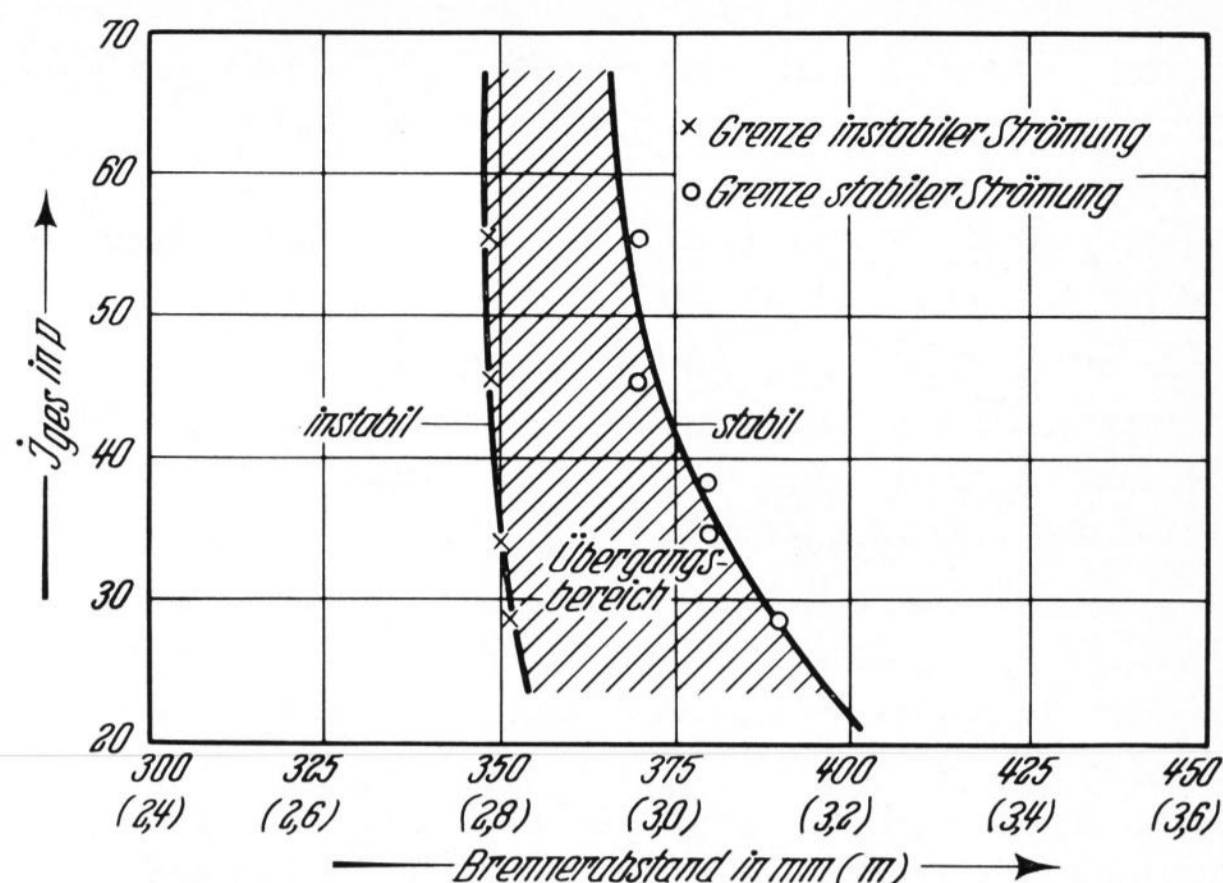


Bild 9. Stabilitätsbereich bei geneigten Brennern.

#### 5. Formelzeichen

- $I_1$  = Impuls der Primärstrahlen
  - $I_2$  = Impuls des Sekundärstrahls
  - $l$  = Abstand des Wirbelmittelpunktes vom Brenner
  - $\dot{m}$  = Massenstrom
  - $Re$  = Reynolds-Zahl
  - $\bar{u}$  = mittlere Geschwindigkeit
  - $\dot{V}$  = Volumenstrom
  - $\rho$  = Dichte
  - BA = Brennerabstand
  - $B_M$  = Modellbreite
  - L = Modelllänge
- Indizes
- Br = Brennstoff
  - Gr = Großausführung
  - L = Luft
  - M = Modell

Der Autor dankt der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, und dem Bundeswirtschaftsministerium, Bonn, für die Förderung der Arbeit durch eine Sachbeihilfe.

#### 6. Literatur

- models and scale-up methods. New York: McGraw Hill 1957.
- [4] STEIN, A.: Konstruktion und Betriebsweise regenerativ beheizter Stirnbrennerwannen (U-Flammenwannen). Glastechn. Ber. **37** (1964) S. 296—301.
- [5] TERADA, K. und WAKAMATSU, M.: Fundamental studies on glass melting tanks. Part I, Model experiments on the flow of gases in an end-port-tank using water and hot gases as the fluids. J. ceram. Assoc. Jap. **67** (1959) S. 61 bis 70. [Ref. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 313.] (47377)

DK 535.862:66.041

## Entwicklung und Anwendungsmöglichkeiten eines Ofenperiskopes

Von THEODOR WERNER, Frankfurt (Main)

(Vortrag auf der 42. Glastechnischen Tagung am 15. Mai 1968 in Würzburg)

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 14. Juni 1968)

Zusammen mit einem namhaften deutschen Hersteller für optische Geräte wurde ein Ofenperiskop mit einem objektseitigen Blickwinkel von 44° entwickelt. Durch Drehen (360°) des Gerätes um seine Längsachse ist ein Raumwinkel von insgesamt 88° zu beobachten, ohne das Gerät in eine andere Position bringen zu müssen. Das im Okular zu beobachtende Bild steht dabei immer aufrecht. Ein Ausblick rechtwinklig zur Periskopachse bei einem objektseitigen Blickwinkel von 44° ist ebenfalls möglich.

Der optische Teil des Gerätes befindet sich in einem wassergekühlten Schutzrohr von 65 mm Außendurchmesser. Zur Objektivkühlung dient Druckluft. Für verschiedene Einsatzmöglichkeiten stehen Periskope mit Einbaulängen von 300, 675 und 1000 mm zur Verfügung.

Bisher wurde das Gerät in Glaswannen mit Maximaltemperaturen von über 1600 °C sowie Hafenoöfen und Tageswannen eingesetzt, um Flammenentwicklung, Einlegen und Abschmelzen des Gemenges sowie den Zustand der feuerfesten Baustoffe während des Ofenbetriebes zu beobachten. Mit Steh-(Kleinbild-) und Laufbildkamera (16 mm) konnten die mit Hilfe des Periskopes beobachteten Details fotografisch aufgenommen werden.

Eine Verbesserung der visuellen Beobachtbarkeit der Vorgänge in Glasschmelzöfen hat viele Vorteile. Die

Flammeneinstellung und das richtige Einlegen des Gemenges wird dadurch erleichtert, der Zustand der feuer-