

DK 662.951.2.001.57:662.767:666.1.031.2

Modelluntersuchungen über Erdgasbrenner für Wannenöfen

Von RUDOLF GÜNTHER, Karlsruhe

(Vortrag auf der 46. Glastechnischen Tagung am 5. Juli 1972 in Wiesbaden)

(Mitteilung aus dem Bereich Feuerungstechnik des Engler-Bunte-Instituts der Universität Karlsruhe (TH))

(Eingegangen am 24. Juni 1972)

Erdgas und Koksofengas werden den Brennern der Glasmelzwannen meistens durch Düsen zugeführt, die in die beiden Seitenwände des Brennerhalses eingebaut sind. Ihre Achse bildet mit der Hauptströmungsrichtung einen Winkel von etwa 45°. Meist wird ein Düsenpaar je Brenner benutzt, für Erdgas werden jedoch manchmal auch mehrere Düsenpaare verwendet. Die Erdgasstrahlen dringen in den Luftstrom ein und werden dabei allmählich in dessen Richtung umgelenkt. Die Teilströme, die bis zur Mitte des Luftstroms vordringen, erzeugen eine Art Staupunktströmung, die zu einer schnellen Vermischung führt. Bisher ist die Mischwirkung dieser Art von Brennern nicht untersucht worden.

An einem kalten Strömungsmodell wird durch Beigabe von Spurenstoffen verfolgt, wie die Mischung von Brenn-

stoff örtlich und zeitlich verläuft und wie sie durch konstruktive Parameter, insbesondere Düsendurchmesser und Anstellwinkel, beeinflußt werden kann.

Außerdem wird mit Hitzdrahtsonde und Frequenzgenerator die Verteilung der Turbulenzenergie über den in Betracht kommenden Frequenzbereich untersucht in der Absicht, Auskunft über Turbulenzgrade und über turbulente Längenmaße, d. h. Wirbelgrößen, zu gewinnen. In der Verbrennungstechnik führen hohe Turbulenzgrade, wie sie in Strahlen und besonders in Staupunktströmungen herrschen, zu schneller Vermischung. Die Flammen werden besonders kurz, wenn gleichzeitig kleine Wirbel erzeugt werden. Will man aber die Leuchtkraft der Erdgasflammen verbessern, so sind große Wirbel günstiger.

Model investigations of ports for natural gas burners for tank furnaces

Natural gas and coke oven gas are most frequently supplied through nozzles set in both side walls of the port neck, their axes being set at about 45° to the main flow. Usually a single pair of burners is used but for natural gas several pairs of burners can be used. The jet of natural gas enters the air stream and bends round in the same direction. The individual streams, which penetrate right up to the middle of the air stream, produce a kind of eddy flow which gives rapid mixing. The mixing action in this type of port has not previously been investigated.

By using tracers injected into a cold model the mixing

of fuel in both time and space has been studied and the effects of design parameters especially nozzle diameter and angle of mounting investigated.

In addition a hot wire probe and frequency generator allow the distribution of turbulent energy with frequency to be investigated and the degree of turbulence and characteristic turbulent length, i.e. vortex size, can be determined. High turbulence especially in eddy flow gives rapid mixing. The flame is very short if sufficiently small vortices can be produced. However, if it is desired to increase the luminosity of natural gas flame, larger vortices are better.

Études sur modèles de brûleurs au gaz naturel pour fours à bassin

Le gaz naturel et le gaz de fours à coke sont souvent conduits aux fours à bassin par des tuyères placées dans les deux parois latérales du col du brûleur. L'axe de ces tuyères forme avec la direction du courant principal un angle d'environ 45°. On utilise d'ordinaire deux tuyères par brûleurs; pour le gaz naturel cependant, il arrive que l'on monte plusieurs paires de tuyères. Les jets de gaz naturel pénètrent dans le courant d'air et sont donc progressivement orientés dans la direction prise par celui-ci. Les courants partiels qui atteignent le milieu du courant d'air produisent une sorte de courant de barrage qui accélère le mélange. L'effet de mélange de ce type de brûleur n'a jamais été étudié jusqu'ici.

On suit, sur un modèle froid de courants et à l'aide de traceurs, l'évolution dans le temps et dans l'espace du mé-

lange du combustible et l'influence qu'exercent sur ce mélange des paramètres de construction tels que le diamètre des tuyères et l'angle de montage.

Une sonde à fil chauffant et un générateur de fréquences permettent d'étudier la répartition de l'énergie de turbulence dans le domaine de fréquences considéré, de manière à obtenir des données sur les degrés de turbulence et les dimensions des courants tourbillonnaires. Les niveaux de turbulence élevés qui règnent dans les jets et en particulier, dans les courants de barrage entraînent un mélange rapide. Les flammes sont particulièrement courtes en l'absence de tout courant tourbillonnaire. Si l'on veut, par contre, améliorer le pouvoir éclairant des flammes de gaz naturel, des mouvements tourbillonnaires importants sont alors préférables.

Die Entdeckung großer Erdgasmengen in Europa hat dazu geführt, daß dieser Brennstoff für Wannenöfen benutzt wird. Man folgt damit einer aus den USA seit langem bekannten Entwicklung.

Bei der Konstruktion der Erdgasbrenner für Wannen liegt es nahe, auf die Erfahrungen zurückzugreifen, die vom Betrieb mit Koksofengas her zur Verfügung stehen. Die bekannteste Konstruktion der Starkgasbrenner für Wannenöfen zeigt Bild 1. Im Brennerhals fließt die vom Regenerator kommende Heißluft. In diesen Strom werden von der Seite her unter einem Winkel von etwa 45° zwei Gasstrahlen eingeleitet. Dieses für Koksofengas seit langem bekannte System läßt sich auch für Erdgas benutzen. Ihm gelten die nachstehend beschriebenen Modelluntersuchungen.

1. Beschreibung des Strömungsfeldes und der Flammen

Strahlen, die in eine Grundströmung eindringen, werden in der Strömungstechnik als Querstrahlen bezeichnet. Während sich Strahlen in ruhender Umgebung drehsymmetrisch ausbreiten, ist bei Querstrahlen das Geschwindigkeits- und Konzentrationsfeld nur am Strahlanfang symmetrisch und wird stromab durch die Grundströmung zunehmend verändert. Der eindringende Strahl teilt den Grundstrom derart, daß auf der Anströmseite eine Art Staupunktströmung und auf der Abströmseite, ähnlich wie hinter einem Festkörper, eine doppelte Wirbelwalze, also eine Nachlaufströmung entsteht, wie dies in Bild 2 schematisch dargestellt ist. Die Profile der Geschwindigkeit und Konzentration werden dadurch

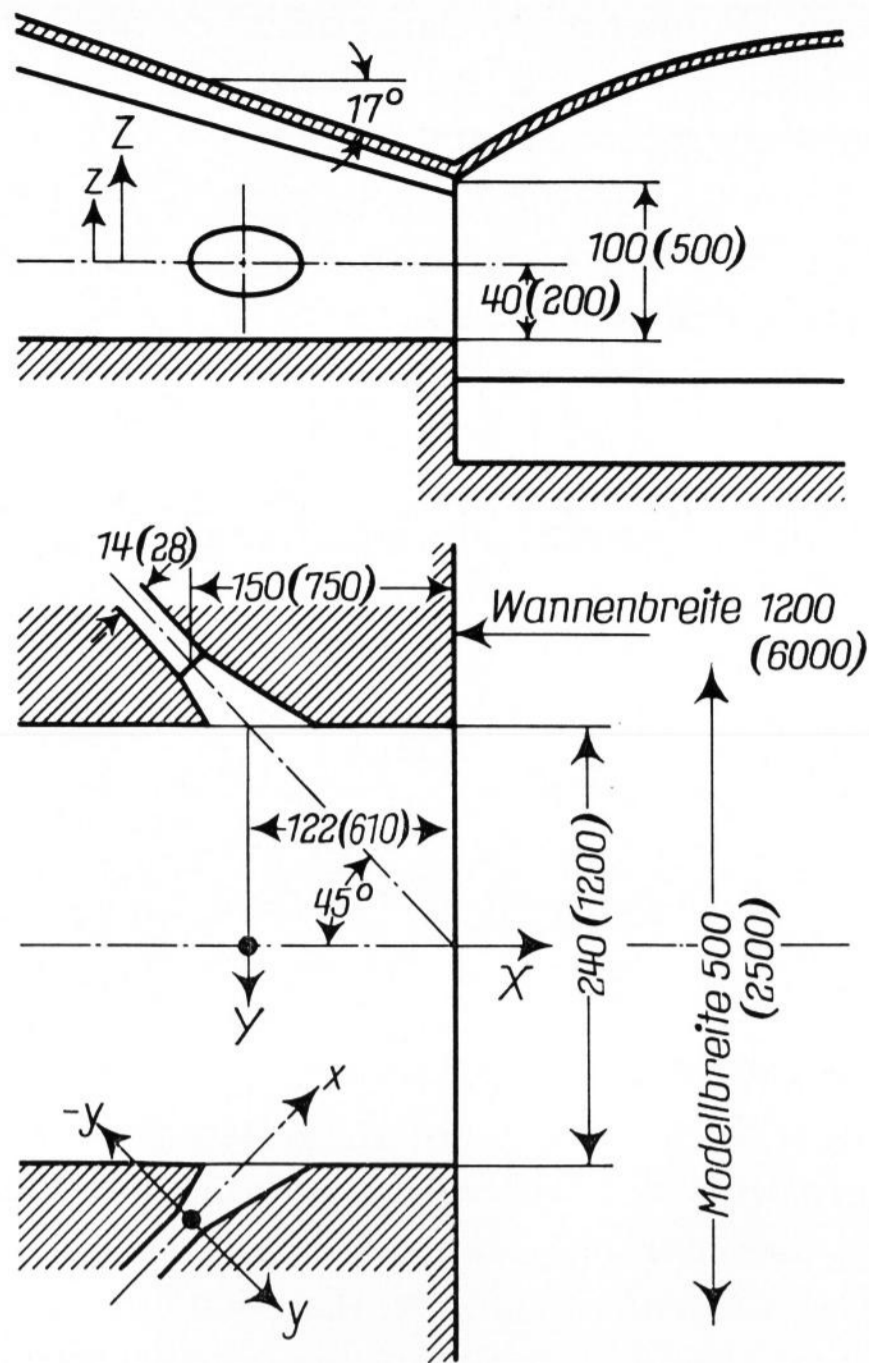


Bild 1. Grundform des als Modell dargestellten Brenners, Maße des Modells und der Großausführung, Koordinaten.

unsymmetrisch. Die einfachen Ähnlichkeitsgesetze der Freistrahlen gelten nicht mehr uneingeschränkt.

Verfolgt man den Weg des Strahls, so stellt man fest, daß die Strahlachse aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt und damit gekrümmt wird. Maßgebend für den Grad der Ablenkung ist das Verhältnis der Impulsstromdichten in Strahl und Grundströmung. Dabei ist zu beachten, daß zwei verschiedene Mittellinien definiert werden können, je nachdem, ob die Schnittflächen, aus denen man sie bestimmt, in die Richtung der Grundströmung oder senkrecht zur Strahlachse gelegt werden. Im Sinne der Lehre von den Strahlen ist zwar nur das Letztere gerechtfertigt, der bequemeren Messung und Auswertung wegen wird manchmal auch der andere Weg eingeschlagen.

Für den Verlauf der wahren Achse von Querstrahlen, die in eine Grundströmung eindringen, wird häufig eine empirische Gleichung von PATRICK [1] zitiert. Erweitert man diese um den am Strahlanfang herrschenden Winkel α zwischen beiden, so lautet sie:

$$\frac{y}{d_0} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0}} \cdot \left(\frac{u_1 \sin \alpha}{u_0} \right)^{-0,85} \cdot \left(\frac{x}{d_0} \right)^{0,38}$$

Hierin sind x die Eindringtiefe in Strahlrichtung, y die Auslenkung der Strahlachse und d_0 der Düsendurchmesser. Bei der Geschwindigkeit u und der Dichte ρ bezeichnet der Index 0 die Strahlsubstanz, der Index 1 die Grundströmung, im Fall des Wannenofenbrenners also Gas und Luft. α ist der Winkel, um den die Strahlachse gegen die Grundströmung geneigt ist.

Die Gleichung gilt für Strahlen ohne Reaktion. Im Fall der brennenden Flammen kann man in erster Näherung als Strahldichte die mittlere Dichte der Flammengase einführen.

Ein Querstrahl wird nach genügend langer Laufstrecke völlig in die Richtung der Grundströmung um-

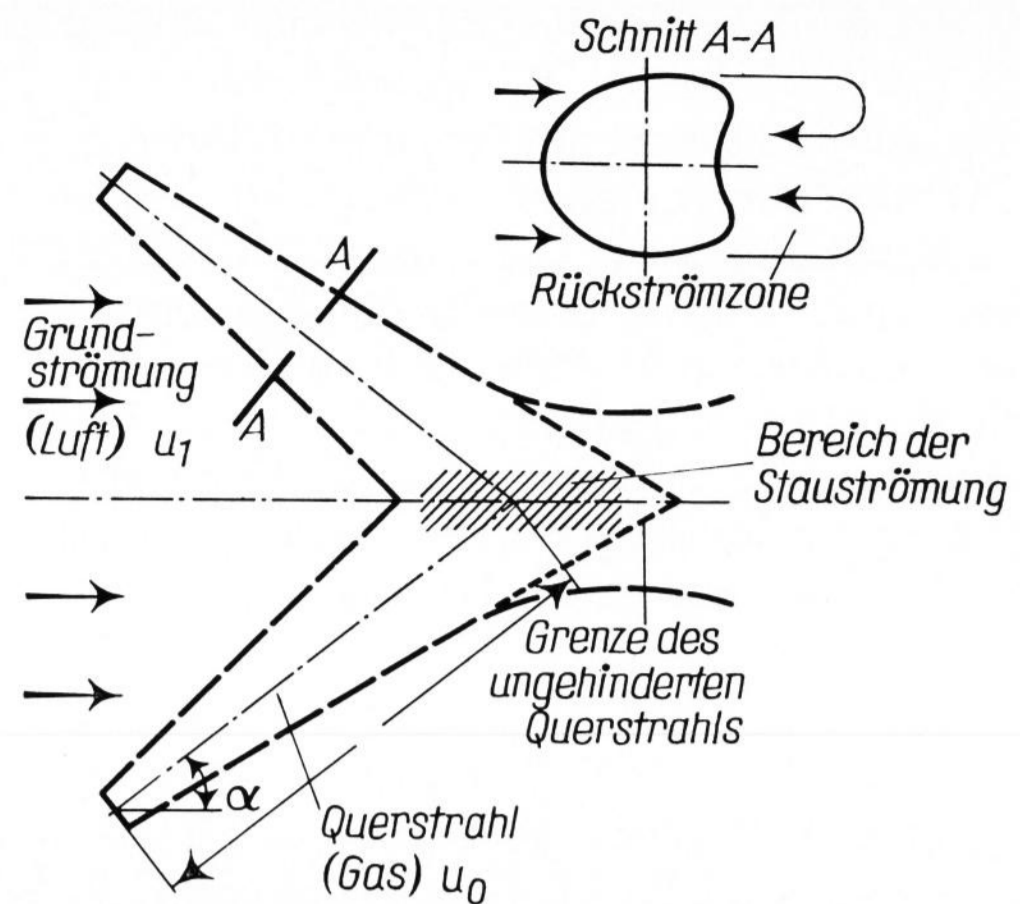
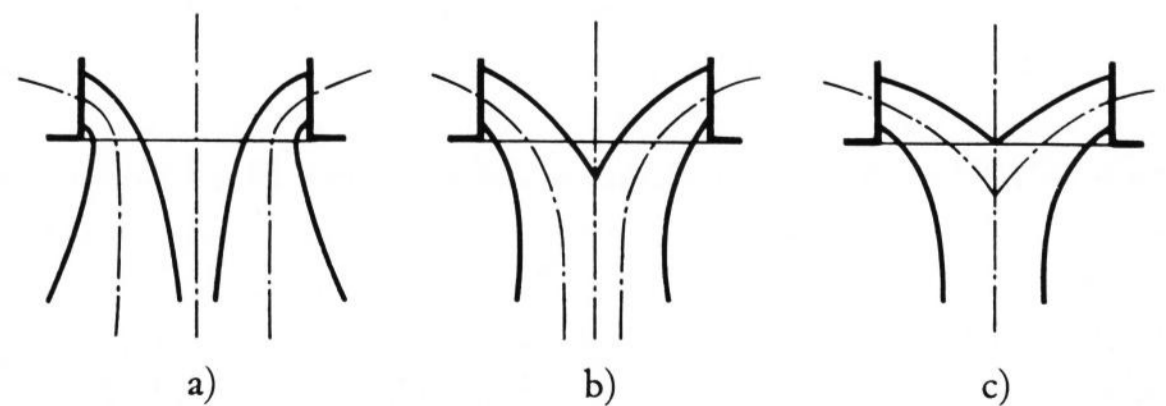


Bild 2. Strömungsfeld eines Brenners nach Bild 1 bei hohem Strahlimpuls.

gelenkt. Die Umlenkung gelingt um so schneller, je höher das Verhältnis der Impulsstromdichten ρu^2 von Grundströmung und Strahl ist.

Man kann zwei grundsätzlich verschiedene Fälle unterscheiden. Bei mäßiger Impulsstromdichte des Strahls wird dieser die Richtung der Grundströmung annehmen, bevor seine Achse die Mittelebene des Brenners erreicht hat. In extremen Fällen kann diese Umlenkung so schnell ablaufen, daß die Strahlen der beiden seitlichen Düsen völlig unabhängig voneinander bleiben, wie Bild 3a zeigt. Erst im Laufe ihrer weiteren Ausbreitung treffen die Strahlränder aufeinander. Bei weniger schneller Umlenkung berühren die Strahlen einander bereits während des Umlenkvorganges (3b). Das andere Extrem besteht darin, daß die Strahlen so wenig aus ihrer Bahn abgelenkt werden, daß sich ihre Achsen schneiden (3c). Dadurch entsteht in diesem Bereich eine Staustromung, ähnlich wie sie beim Auftreffen eines Strahls auf eine Platte beobachtet werden kann. Die Staustromung zeichnet sich durch hohe Turbulenzgrade aus. Im Falle der Brenner ist sie für die Mischung von Gas und Luft förderlich.

Im Wannenofenbrenner setzt die Verbrennung am Rande der beiden Gasstrahlen ein und breitet sich mit der Zeit über die ganze Dicke der Gasstrahlen aus. Wenn auch keine volle Symmetrie herrscht, so haben die Vorgänge doch eine gewisse Ähnlichkeit mit den im ungestörten Freistrahle herrschenden, man hat also im Strahlkern mit Gasüberschuß, an den Rändern mit Luftüberschuß zu rechnen. Die Asymmetrie bewirkt, daß auf der Abströmseite nicht reine Luft, sondern ein Gemisch aus Luft und Abgas in den Strahl gelangt.



Bilder 3a bis c. Verlauf der Teilstrahlen bei:

a) niedrigem, b) mittlerem und c) hohem Impuls der Brennstoffstrahlen.

Für das Betriebsverhalten der Brenner ist es wichtig, wieviel Luft die beiden Brennstoffstrahlen auf ihrem Weg bis zum Zusammentreffen ihrer Ränder oder gar ihrer Achsen aufgenommen haben und wie weit sie dabei ausgebrannt sind. Geht man von Freistrahlerhältnissen aus, so kann man für die Berechnung dieses Vorgangs die für den Ähnlichkeitsbereich gültige Formel für den Verlauf des Massenstroms benutzen. Diese enthält lediglich die Aussage, daß die Impulskraft des Strahls längs seines Weges konstant bleibt, und daß der Strahlwinkel 19° beträgt [2]. Die Beziehung lautet:

$$\frac{\dot{M}}{\dot{M}_0} = 0,32 \cdot \frac{x}{d_0} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0}}$$

Für ρ_1 wird die Dichte der Flammengase eingeführt. Dabei ist vorausgesetzt, daß der gesamte Strahlumfang am Stoffaustausch mit der Umgebung teilnimmt. Sobald die Ränder der beiden Teilstrahlen zusammentreffen, ist diese Bedingung nicht mehr voll erfüllt, je nach geometrischen Verhältnissen wird die freie Fläche verändert, die Luftansaugung wird geringer als im Freistrahler, außerdem wird die Flamme unsymmetrisch. Früher oder später vereinigen sich die Teilstrahlen zu einem Einzelstrahl, der allerdings infolge der vorausgegangenen unsymmetrischen Zuströmvorgänge zunächst nicht drehsymmetrisch ist.

2. Modellbrenner und Ähnlichkeitsgesetze

Zum Studium der Strömungs- und Mischungsverhältnisse in einem Erdgasbrenner der beschriebenen Art wurde ein kaltes Modell gebaut, in welchem die Gasströme durch Luft mit Zusatz von 3% Methan, der Luftstrom durch unvermischte Luft dargestellt wurde. Dem Modell liegen folgende Daten der Großausführung zugrunde:

Brennstoffstrom:	2 · 115 m ³ _n /h,
Dichte des Gases (Erdgas):	0,71 kg/m ³ _n ,
Austrittsgeschwindigkeit des Gasstroms:	50 m/s,
Luftstrom:	2300 m ³ _n /h,
Lufttemperatur:	1300 °C,
Austrittsgeschwindigkeit des Luftstroms bezogen auf Brennermündung:	6,7 m/s,
Anstellwinkel der Gasstrahlen:	45°,
vom Brenner beheizte Badfläche:	2,5 · 6,0 m ² ,
Modellmaßstab:	1:5.

Die wichtigsten Konstruktionsmaße des Modells sind in Bild 1 eingetragen, die Maße der Großausführung sind in Klammern beigefügt.

Die Koordinaten x, y, z der Einzelstrahlen zählen vom Strahlursprung, die der Grundströmung X, Y, Z von der Mitte des Düsensteinaustritts und der Brennerbank (Bild 1). Das Modell wurde im Maßstab 1:5 der Großausführung gebaut, um bei erträglicher Größe der Luftströme die Störung der Strömung durch Meßsonden gering zu halten. Das Modell sieht eine gleichmäßige achsparallele Strömung der Luft am Eintritt zum Brennerhals vor, was etwa den Verhältnissen am Austritt aus einer Regenerativkammer entspricht. Der Brennraum ist im Modell für den Wirkungsbereich eines Brenners

und bis zur Wannennmitte dargestellt, da die Strömung im abziehenden Bereich und Einzelheiten der Rückströmung nicht interessierten.

Als Modellbedingung wird bei kalten Modellen von Freistrahler von der Gleichheit der Impulsverhältnisse ausgegangen, man wählt also:

$$\left(\frac{I_{Br}}{I_L}\right)_{Gr} = \left(\frac{I_{Br}}{I_L}\right)_M$$

mit den Indizes Br und L für Brennstoff und Luft sowie Gr und M für Großausführung und Modell. In der Großausführung ist im vorliegenden Fall

$$I_{Br} = 2 \cdot \frac{115 \cdot 0,71}{3600} \cdot 50 = 2 \cdot 1,13 \frac{\text{m kg}}{\text{s}^2}$$

und

$$I_L = \frac{2300 \cdot 1,293}{3600} \cdot 6,7 = 5,52 \frac{\text{m kg}}{\text{s}^2}$$

Das Verhältnis beider ist 0,41.

Bei dem hier untersuchten System bestimmt das Impulsverhältnis den Mischungsverlauf insbesondere in dem Teil des Strahls, der parallel zur Brennerachse strömt. Der Umlenkvorgang ist dagegen vom Verhältnis der Impulsstromdichten abhängig. Nun ist es aber unmöglich, bei der Modelldarstellung sowohl das Verhältnis von ρu^2 wie das von $\rho u^2 F$ der beiden Ströme gleichzuhalten, da wegen der Anwendung des äquivalenten Durchmessers keine volle geometrische Ähnlichkeit besteht. Deshalb wurde bei der Wahl des äquivalenten Düsendurchmessers ein Kompromiß getroffen.

Der äquivalente Durchmesser d_a berücksichtigt die Tatsache, daß sich der Strahl in der Feuerung in heißem Rauchgas ausbreitet, im Modell dagegen in kalter Luft. Unter Beachtung des Modellmaßstabes 1:5 würde im vorliegenden Fall

$$d_a = \frac{1}{5} \cdot d_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_f}}$$

mit den Indizes o für die Strahlsubstanz und f für die Feuergase. Damit würde d_a etwa gleich 11,5 mm. Mit Rücksicht auf die eben angestellten Überlegungen wurde $d_{oM} = 14$ mm gewählt. Dabei wurde das vorher berechnete Impulsverhältnis Brennstoff/Luft eingehalten. Die Reynolds-Zahlen sind so hoch, daß der Einfluß der Reibungskräfte sicher auszuschließen ist. Für den Modellstrahl mit den später festgelegten Eigenschaften ist $Re = 28500$, für die Großausführung ist $Re = 102000$.

Die Vernachlässigung der Dichteunterschiede durch das kalte Modell fällt im vorliegenden Fall zwar für die Verhältnisse am Strahlanfang ins Gewicht, nicht aber für die Mischungszone zwischen der sich entwickelnden Flamme und dem Heißluftstrom, da hier auch in der Großausführung nur geringe Dichteunterschiede bestehen.

Auf Grund dieser Überlegungen wurden für den Modellbetrieb folgende Daten gewählt:

Strahlen:

$$\dot{V}_0 = 2 \cdot 15 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}, \quad u_0 = 27 \text{ m/s}, \quad I_{Br} = 2 \cdot 0,146 \text{ m kg/s}^2;$$

Luftstrom:

$$\dot{V}_1 = 396 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}, \quad u_1 = 5 \text{ m/s}, \quad I_L = 0,71 \text{ m kg/s}^2.$$

$I_{Br}/I_L = 0,41$ stimmt mit dem Wert der Großausführung überein.

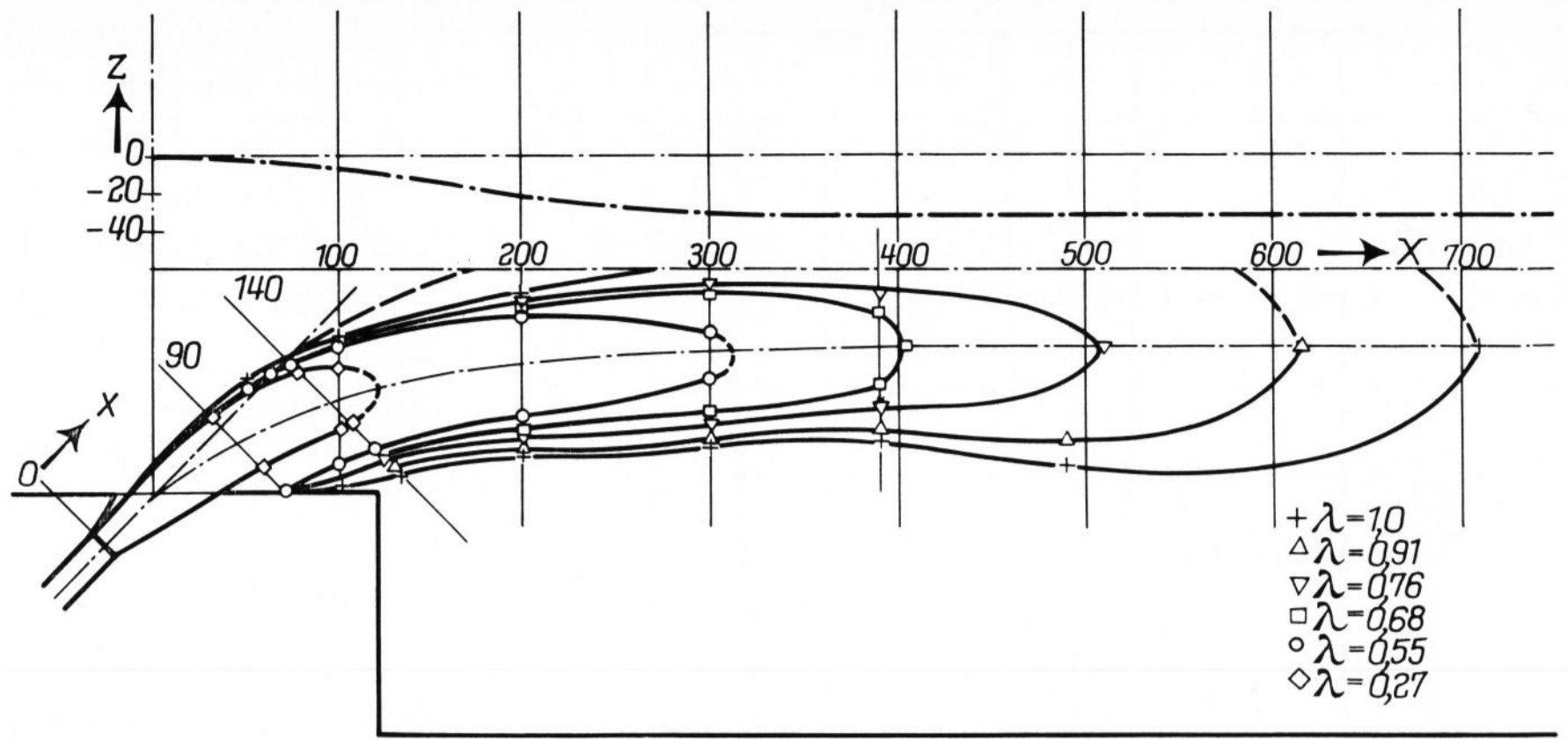


Bild 4. Konzentrationsverteilung in der waagerechten Schnittebene der Flammenachse, Höhenkoordinate der Flammenachse.

3. Meßergebnisse der Grundauführung

Der Verlauf des Strahls ist aus dem Konzentrationsfeld in seiner Mittelebene (Bild 4) sowie aus dem senkrechten Schnitt durch den Strahl, der 80 (400) mm außerhalb der Brennermündung gelegt wurde (Bild 5), ersichtlich. Durch die Neigung des Gewölbes wird die Strahlachse nach unten abgelenkt, der Verlauf ist im oberen Teil von Bild 4 gezeigt. Die Konzentrationskurven gelten für die hierdurch beschriebene gekrümmte Fläche. Die eingeklammerten Längenmaße beziehen sich jeweils auf die Großausführung.

Man erkennt, daß der Verlauf der Strahlen dem Fall des Bildes 3b entspricht. Die Strahlränder berühren einander außerhalb des Brennerhalses. In der Ebene des Bildes 5 sind die Strahlmitten noch etwa 100 (500) mm voneinander entfernt, man erkennt deutlich die beiden Einzelstrahlen. Erst etwa 50 (250) mm außerhalb der Brennermündung beginnen die Strahlen sich zu vereinigen. Das Flammenende läßt sich aus der Lage des Punktes herleiten, bei dem auf der Strahlachse im Modell stöchiometrisches Gemisch vorliegt. Er wird 590 (2950) mm außerhalb des Brenners gefunden. Der gekrümmte Weg von der engsten Stelle des Düsensteins bis zu diesem Punkt ist 760 (3800) mm lang.

Freistrahlfammen sind infolge der Ungemischtheit um den Faktor 1,3 länger als der Abstand zwischen der Düse und dem Ort stöchiometrischer Mischung. Im vorliegenden Fall wird mit dem Faktor 1,2 gerechnet, da der Turbulenzgrad, wie später gezeigt wird, höher ist als bei Freistrahlen, und da auch die Asymmetrie der Einzelstrahlen die Mischung beschleunigt. Verzögernd wirkt dagegen die Annäherung der Strahlen aneinander. Wie in Bild 5 deutlich zu sehen ist, muß Luft im Bereich außerhalb des Brenners vorwiegend an der Oberseite und der Außenseite der Strahlen eingemischt werden. Die tatsächliche Flammenlänge beträgt also etwa 910 (4550) mm, das Flammenende liegt 740 (3700) mm stromab von der Brennermündung.

Als Ergänzung zu Bild 5 zeigt Bild 6 den Geschwindigkeitsverlauf in der Ebene des Bildes 5 in der Höhe der Strahlachse. Man erkennt deutlich, daß sich die Strahlen erst teilweise vereinigt haben.

Die Geschwindigkeit eines der Einzelstrahlen in Richtung seiner Achse vor der Vereinigung der Strahlränder zeigt Bild 7 für die Stelle $x = 140$ (700), $z = 0$. Infolge der Grundströmung hat sich die Strahlachse um 23 (115) mm von der Düsenachse entfernt, $y = +23$ (115) mm entspricht dem Ort der Strahlachse. Zum Ver-

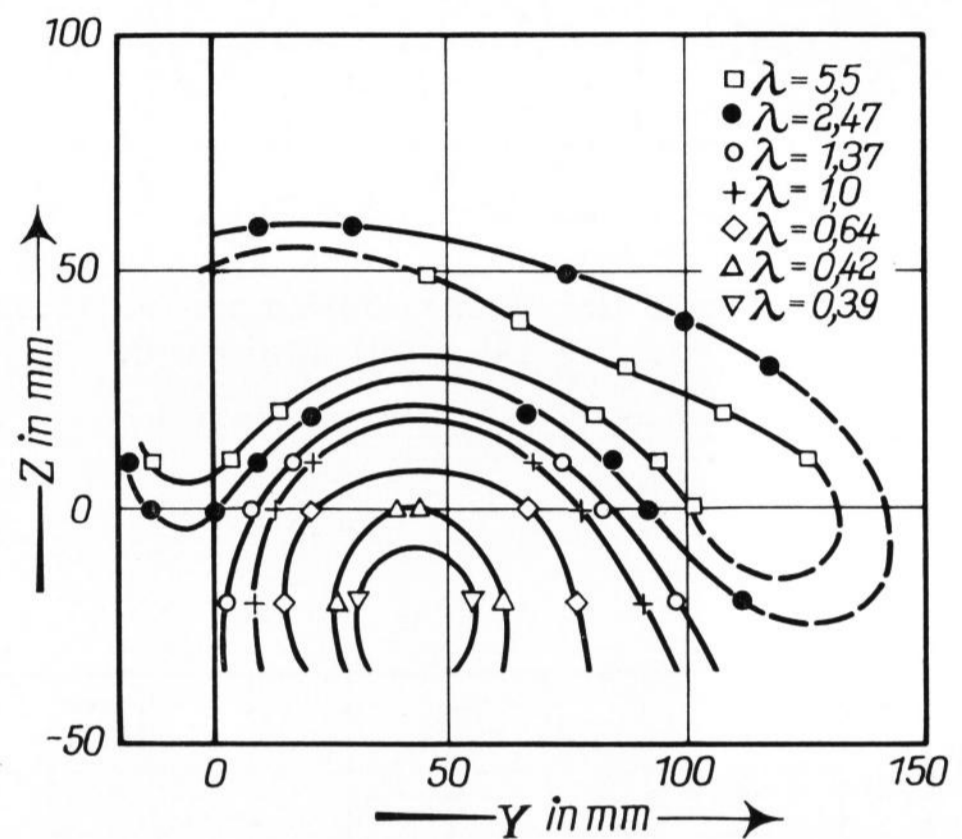


Bild 5. Konzentrationsverteilung in der senkrechten Ebene $X = 200$ (1000) mm, d. h. wenig außerhalb der Brennermündung.

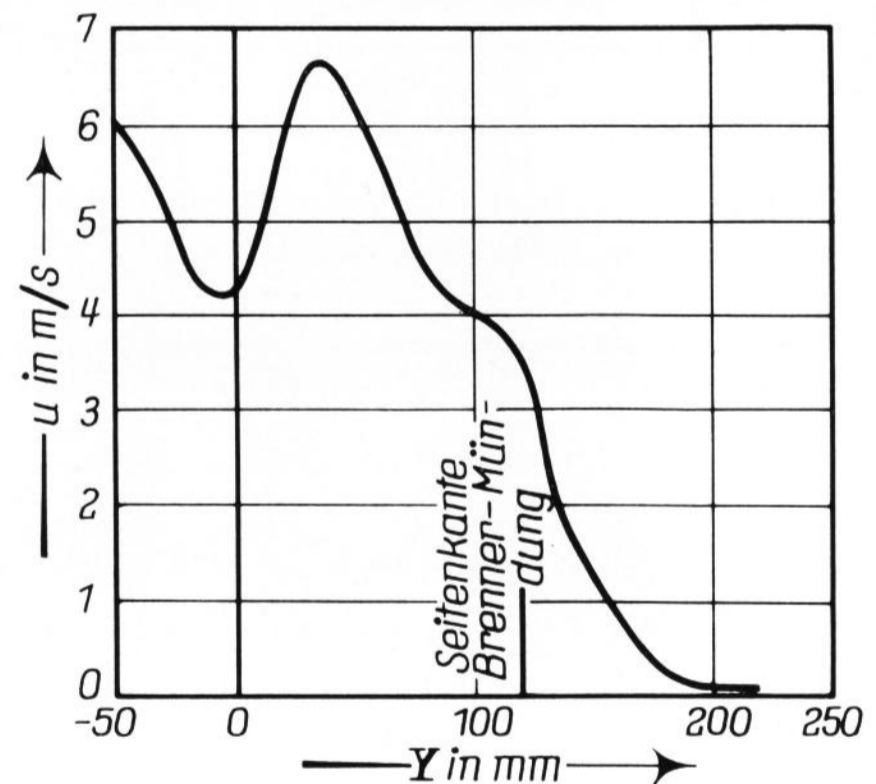


Bild 6. Geschwindigkeitsverlauf längs der Linie $X = 200$ (1000) mm, $Z = 0$.

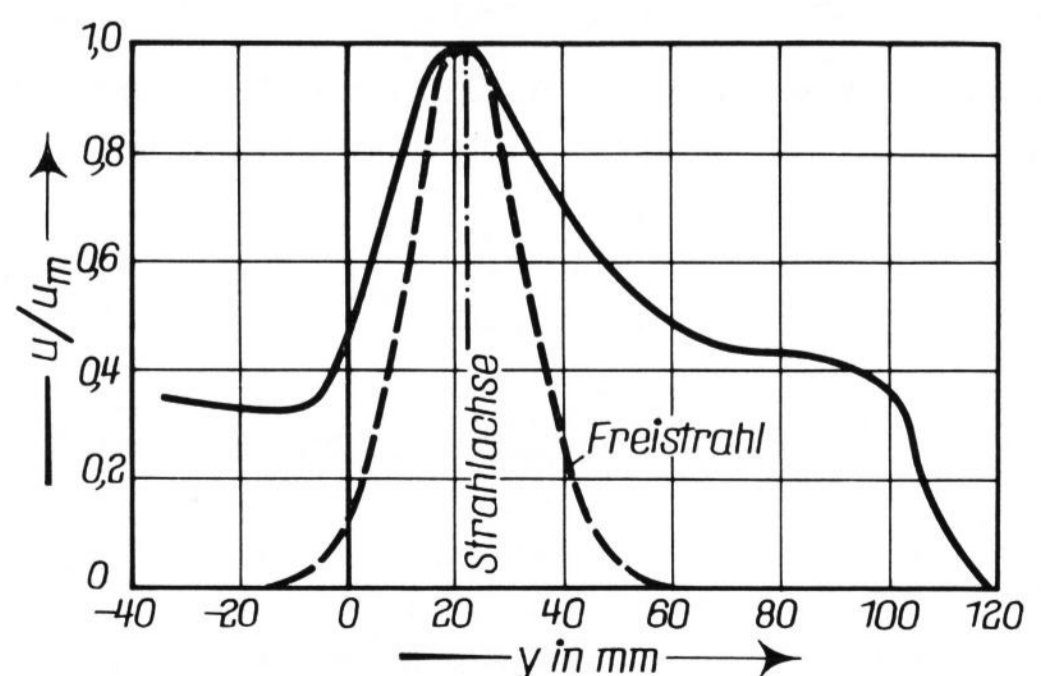


Bild 7. Geschwindigkeitsverlauf in Richtung der Düsenachse bei $x = 140$ (700) mm, $z = 0$ in Strahlrichtung gesehen. Vergleich mit dem ungestörten Freistrahler.

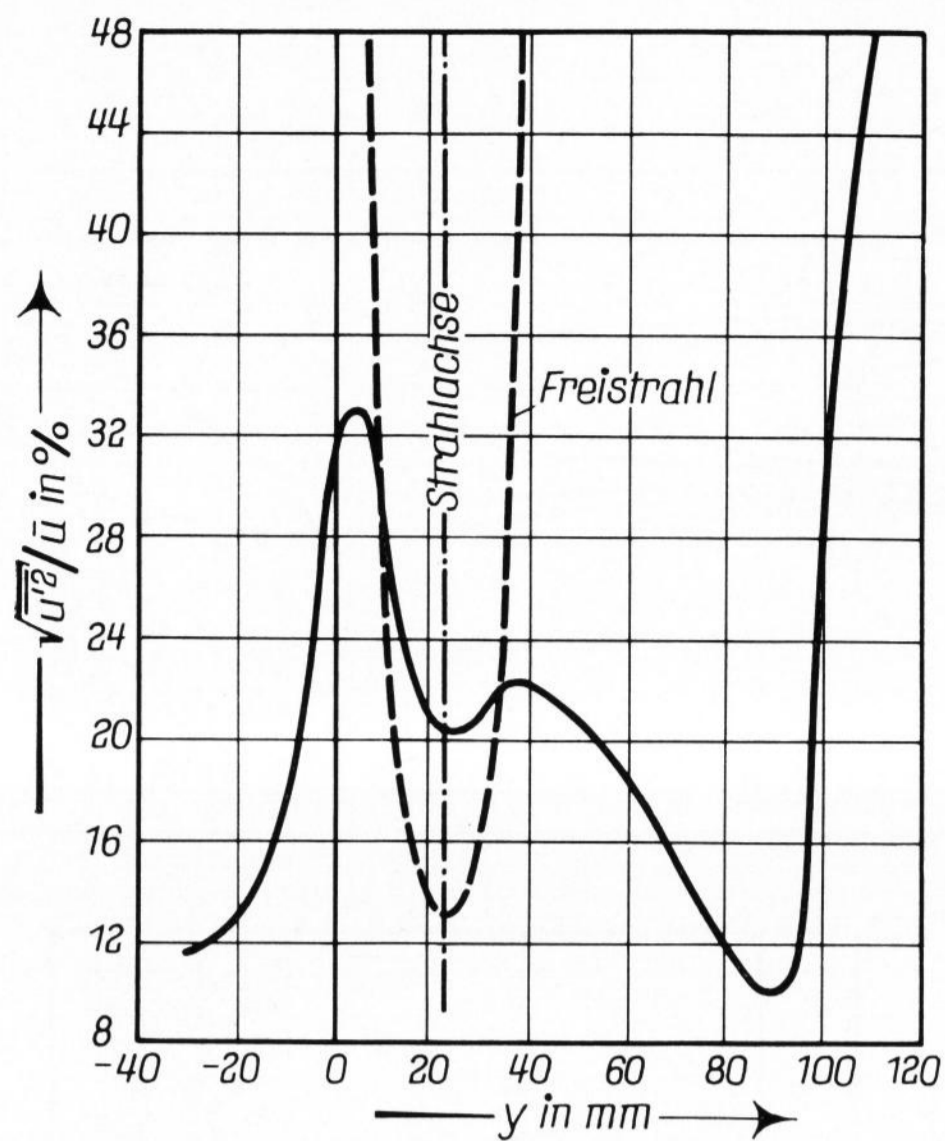


Bild 8. Turbulenzgrad der Achskomponente der Geschwindigkeit bei $x = 140$ (700) mm, $z = 0$.
Vergleich mit dem ungestörten Freistrah.

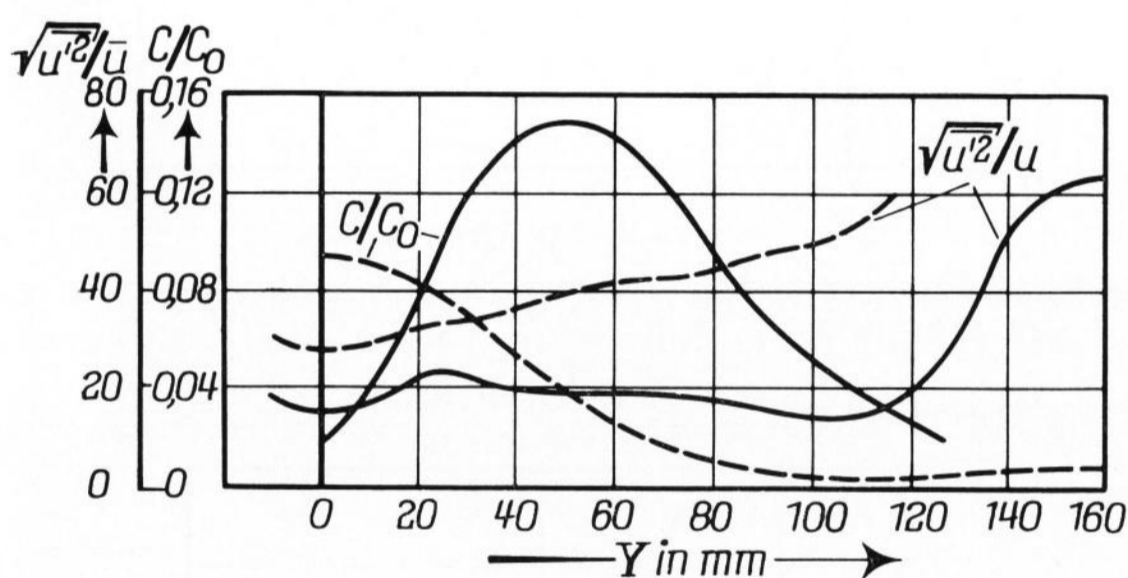


Bild 9. Konzentration und Turbulenzgrad längs $X = 200$ (1000) mm, $Z = 0$.

Normaleinstellung und vierfaches Impulsverhältnis.
— $I_{\text{Gas}}/I_{\text{Luft}} = 0,41$; - - - - $I_{\text{Gas}}/I_{\text{Luft}} = 1,64$.

gleich ist die Verteilung in einem ungestörten Freistrah eingetragen, so daß man den Einfluß der Grundströmung deutlich erkennt. Diese stört das Geschwindigkeitsfeld auf der Anströmseite nur wenig, auf der Abströmseite bildet sich die in Bild 2 gezeigte Nachlaufzone, d. h. der Strahl wird hier breiter.

Eine erste Vorstellung über den Mischungsmechanismus im Querstrahl gibt der Turbulenzgrad $\sqrt{u'^2}/\bar{u}$, der in Bild 8 für den gleichen Querschnitt gegeben ist, für den Bild 7 gilt. Zum Vergleich ist wieder der Freistrah eingetragen, wobei auf Meßwerte von LENZE [3] zurückgegriffen wurde. Besonders auffällig sind die Steigerung des gesamten Turbulenzniveaus und die hohe Turbulenz auf der Anströmseite, die durch die starken Geschwindigkeitsgradienten des Strahls gegenüber der in anderer Richtung fließenden Querströmung entstehen. Die Turbulenzgrade sind mit der örtlichen Geschwindigkeit gebildet. Wenn auch eine vollständige Auskunft über die Mischungsverhältnisse erst bei Kenntnis der Querschwankungen und der Wirbelgrößen gegeben werden kann [4], so lassen doch schon die be-

grenzten Feststellungen des Bildes 8 eine kräftige Steigerung der Mischung durch die Queranströmung erwarten.

Eine ungestörte Freistrahflamme hätte unter den Verhältnissen der Großausführung eine Länge von etwa $190 d_0$, d. h. etwa 5,3 m, gegenüber den hier gefundenen 4,5 m. Der Unterschied kann sowohl auf die Querstrahlanordnung wie auf die erwähnten Unsicherheiten der Modelldarstellung zurückgehen. Das Hauptgewicht ist deshalb auf den Vergleich der verschiedenen Einstellungen und Geometrien zu legen, über die nachstehend berichtet wird.

Eine Nachprüfung der Gleichung von PATRICK [1] mit Hilfe der Modellmessungen ergab keine Übereinstimmung. Eine einfache grafische Addition des Strahlimpulses und der Kraft, die von der Grundströmung auf die Projektion der Außenfläche des Strahls ausgeübt wird, gab dagegen den gemessenen Strahlverlauf sehr gut wieder.

Um eine Orientierung darüber zu gewinnen, wie sich die Mischungsverhältnisse mit dem Strahlimpuls verändern, wurde statt des Wertes $I_{\text{Br}}/I_{\text{L}} = 0,41$ der Großausführung und der bisher mitgeteilten Versuche ein Wert $I_{\text{Br}}/I_{\text{L}} = 4 \cdot 0,41 = 1,64$ eingestellt. Aus meßtechnischen Gründen wurden zu diesem Zweck bei gleichbleibenden Daten der Brennstoffstrahlen der Luftstrom auf die Hälfte zurückgenommen und diese Veränderung des Massenverhältnisses in der Stöchiometrie entsprechend berücksichtigt. Wie zu erwarten, stellte sich der Fall von Bild 3c ein. Bild 9 zeigt den Verlauf der Konzentration und des Turbulenzgrades längs der Linie $X = 200$ (1000), $Z = 0$, also eine Schnittlinie in Düsenhöhe außerhalb der Brennermündung. Man erkennt, daß sich bei dem hohen Impulsverhältnis die Strahlen bereits vereinigt haben, während bei der Normaleinstellung an dieser Stelle noch zwei deutlich getrennte Maxima vorliegen. Andererseits sind infolge der Stauströmung deutlich höhere Turbulenzgrade vorhanden, als bei der allmählichen Vereinigung der Strahlen auftraten.

Die Mischung ist bei dem höheren Impulsverhältnis viel weiter fortgeschritten als unter Normalbedingungen, was vorwiegend auf den höheren Strahlimpuls zurückzuführen ist. Die mittlere Flammenlänge hat sich dabei auf etwa 490 (1950) mm vermindert. Die wahre Flammenlänge beträgt nach den eben angestellten Überlegungen etwa 585 (2925) mm. Gegenüber der Grundeinstellung ist die Flamme um 35% kürzer geworden. Beim Freistrah hätte man eine Verkürzung im Verhältnis $1/\sqrt{I}$ erwartet, im vorliegenden Fall also um 50%. Der Unterschied muß mit den Besonderheiten der Querstrahlströmung erklärt werden.

4. Varianten der Großausführung

Als Ergänzung zu den bisher dargestellten Ergebnissen wurden zwei weitere Düsengeometrien untersucht. In einem Fall waren auf jeder Seite des Brennerhalses statt einer großen Düse zwei kleinere Düsen entsprechend kleineren Querschnitts übereinander angebracht. Auf diese Weise sollte das Verhalten der für Erdgasbetrieb oft empfohlenen Doppel- oder Dreifachdüsen geprüft werden. In einer weiteren Variante wurde der Anstellwinkel des Strahls verändert. Die entspre-

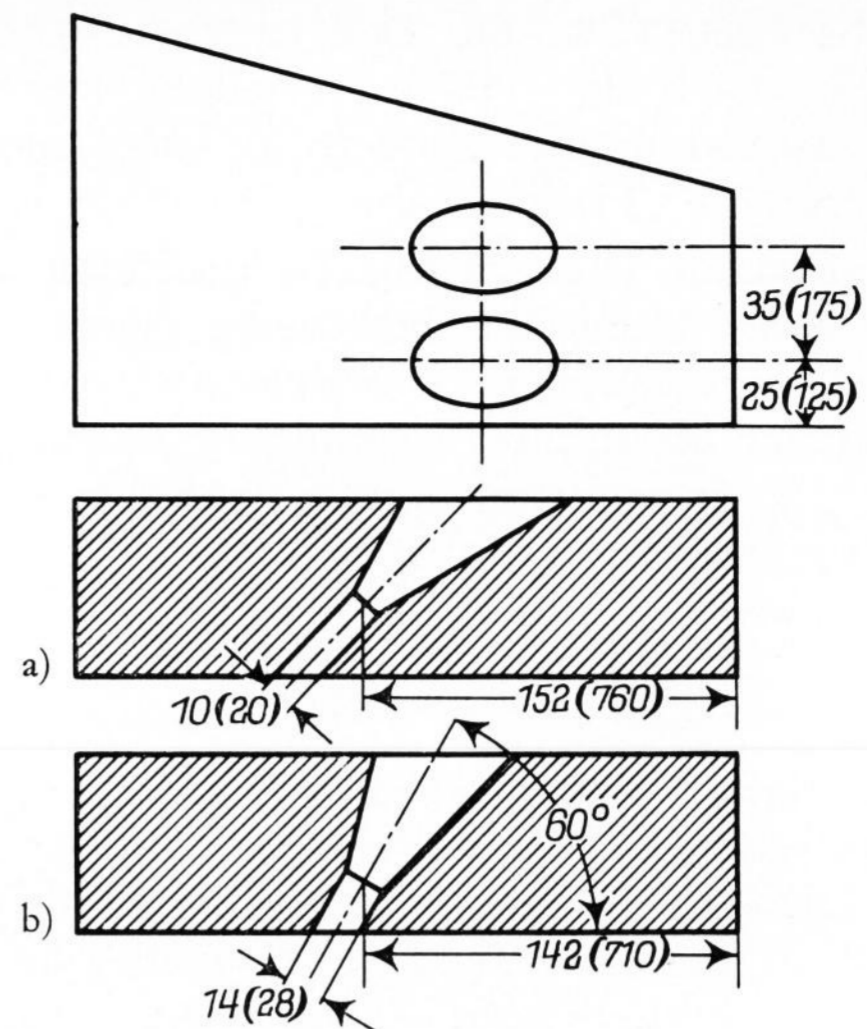
chenden Konstruktionsdaten sind in den Bildern 10a und b gezeigt. In beiden Fällen wurde mit dem Impulsverhältnis 0,41 gearbeitet, das der Großausführung entspricht.

4.1. Mehrfachdüsen

Als Wirkung von Mehrfachdüsen wird meist eine Beschleunigung der Mischung und eine Verkürzung der Flamme erwartet, da man weiß, daß beide Größen dem Düsendurchmesser proportional sind. Diese Maßnahme wird jedoch nur dann voll wirksam, wenn sich die Teilstrahlen unabhängig voneinander entwickeln können. Bei den hier beschriebenen Konstruktionen ist das mit Sicherheit nicht der Fall, da der Abstand zwischen den Düsen aus konstruktiven Gründen begrenzt ist.

Im vorliegenden Fall wirkte sich die Aufteilung so aus, wie Bild 11 zeigt. Es enthält das Konzentrationsfeld in einem Querschnitt durch die Flamme in Höhe der gekrümmten Achse des unteren Strahls. Außerdem ist ein senkrechter Schnitt durch den Flammenanfang für den Bereich gezeigt, in dem sich die Strahlen vereinigen. Man sieht, daß dieser Vorgang recht schnell abläuft. Noch innerhalb der Brennermündung wird aus den Teilstrahlen ein Einzelstrahl gebildet, der allerdings nicht rotationssymmetrisch ist.

Stöchiometrisches Gemisch wird 530 (2150) mm außerhalb der Brennermündung gefunden, die wahre Länge der gekrümmten Flamme beträgt 850 (4250) mm.



Bilder 10a und b. Varianten der Grundausführung. a) Doppeldüse; b) Anstellwinkel 60°.

Die Flammen sind also nur wenig kürzer als beim Einzelstrahl. Der Unterschied beträgt etwa 7%.

4.2. Anstellwinkel

Für den Anstellwinkel von 60° zeigt Bild 12 wiederum das Konzentrationsfeld in einer waagerechten Schnittfläche, die durch die nach unten gekrümmte

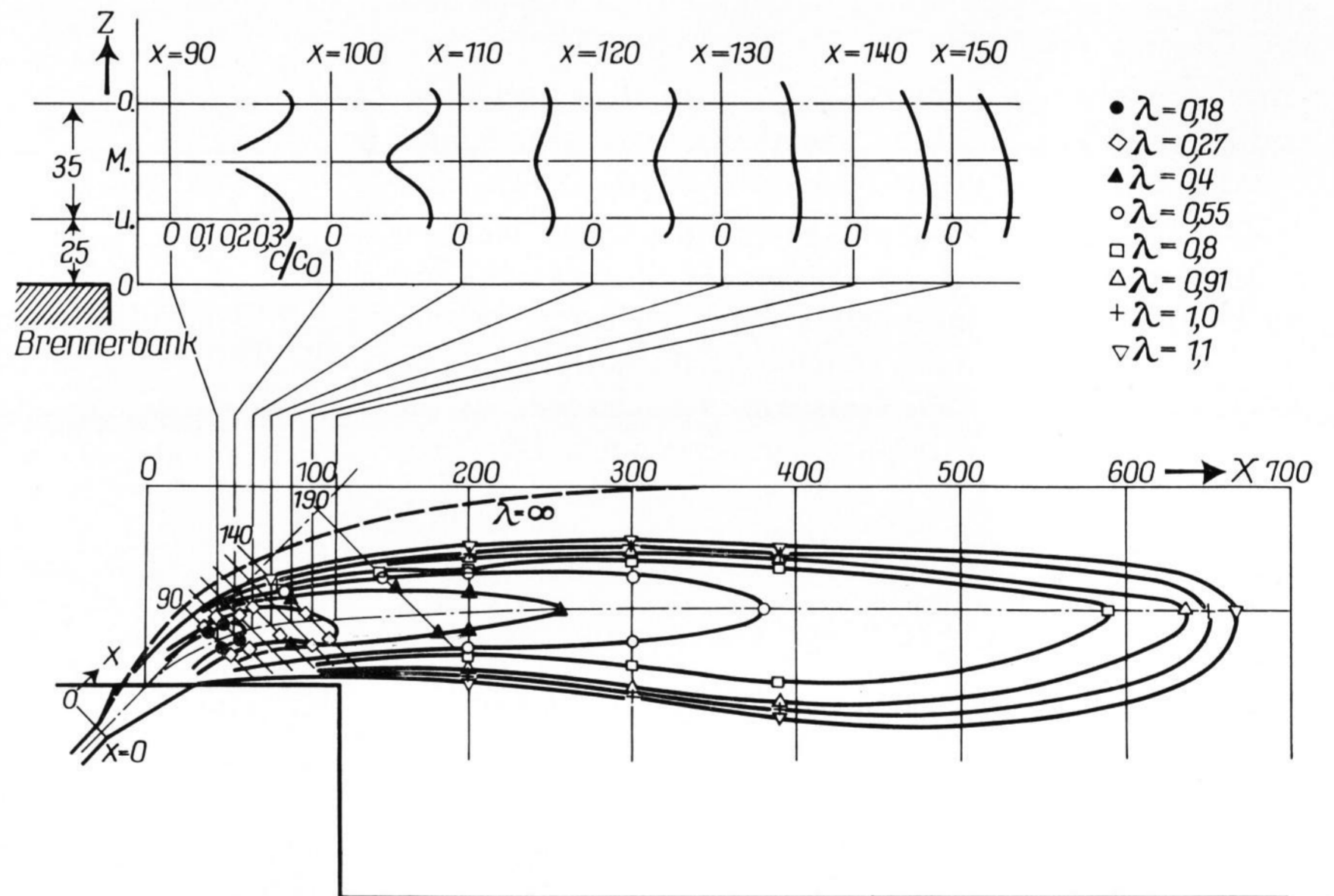


Bild 11. Konzentrationsfeld des Doppelstrahls. Senkrechte und waagerechte Schnittfläche durch die gekrümmte Strahlachse.

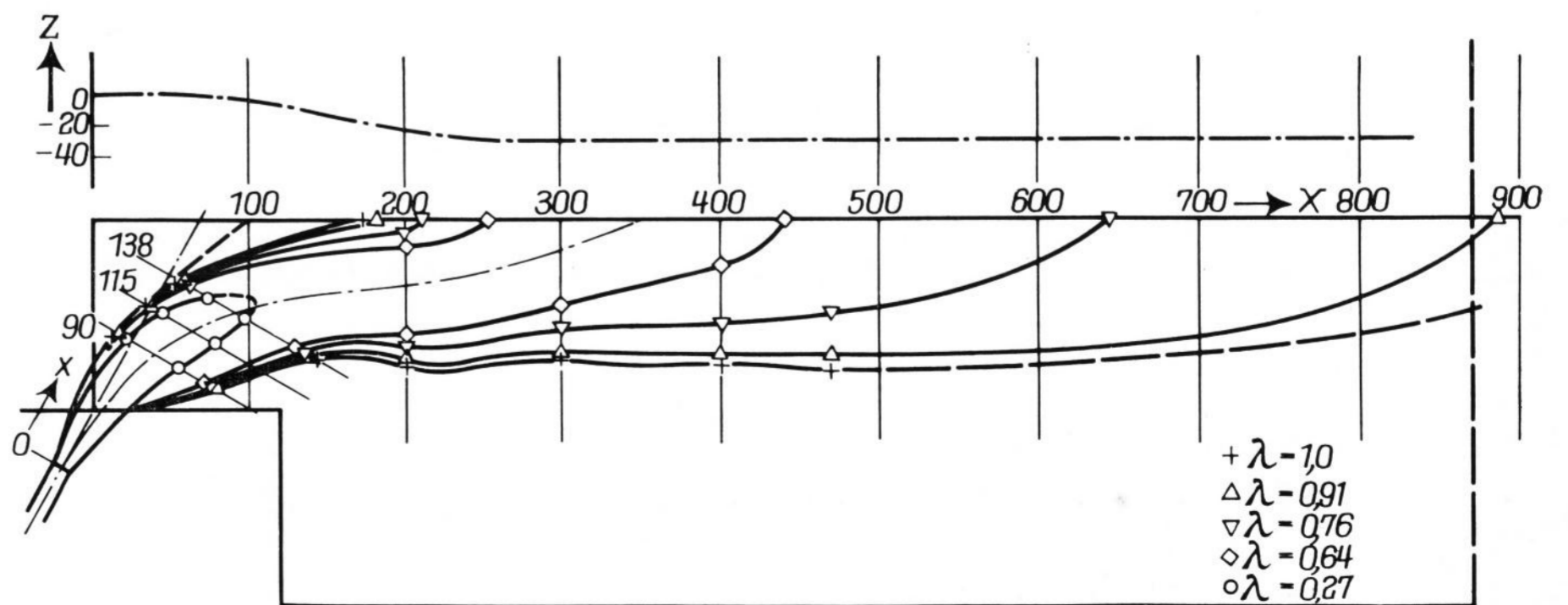


Bild 12. Anstellwinkel 60°. Konzentrationsfeld in waagerechter Schnittfläche durch die gekrümmte Strahlachse.

Strahlachse gelegt wurde. Das Ergebnis ist insofern überraschend, als die steilere Anstellung nicht zu der erwarteten Verkürzung, sondern zu einer merklichen Verlängerung der Flamme führte.

Orientierende Vergleichsmessungen mit Anstellwinkeln von 90 und 30° bestätigten dieses Ergebnis. Offenbar ist bei großem Anstellwinkel der Weg der Einzelstrahlen bis zu ihrer Vereinigung so kurz, daß sie nur wenig Luft ansaugen können. Die Ansaugung des vereinigten Strahls ist deutlich geringer als die der beiden Einzelstrahlen.

4.3. Injektorbrenner

Eine weitere Variante besteht in der gelegentlich vorgeschlagenen Benutzung von Injektorbrennern für Erdgas. Dieser Fall wurde zwar im Modell nicht untersucht, jedoch lassen sich die Wirkungen etwa abschätzen. Bei dieser Anordnung wird der Mischungsverlauf durch zwei Vorgänge beschleunigt. Einmal wird die treibende Substanz sehr schnell in den Strahl eingemischt, so daß eine ähnliche Wirkung wie bei Vormischung eintritt. Die Flamme wird proportional der Vormischung verkürzt, ein Injektor, der z. B. 3% der Verbrennungsluft als Treibmittel verbraucht, wie man es im vorliegenden Fall erwarten kann, würde durch seinen Vormischeffekt die Flamme um 3% verkürzen. Dieser Vorgang fällt also nicht ins Gewicht.

Hinzu kommt die Wirkung der Impulskraft des Injektorstroms. Wählt man den Impuls des Luftstrahls ebenso groß wie den des Gasstrahls, so verdoppelt sich der Gesamtimpuls des Strahls, und die Flamme verkürzt sich um den Faktor $1/\sqrt{2}$, sofern man Freistrahlerhältnisse ansetzt, was nach den vorausgehenden Untersuchungen in erster Näherung zulässig ist.

Der gleiche Effekt kann aber auch erreicht werden, wenn man den Impuls des Gasstroms durch Erhöhung der Austrittsgeschwindigkeit steigert. Selbst wenn der Gasdruck hierfür nicht ausreicht, dürfte es billiger sein, einen Verdichter in den Gasstrom zu schalten, als die komplizierten Injektorbrenner zu verwenden. Der Vor-

teil der Injektion liegt also vorwiegend in der Möglichkeit, die Flammenlänge auf einfache Weise zu regeln, jedoch kann dieser auch durch äußere Vormischung und andere Maßnahmen erreicht werden [5 und 6].

5. Zusammenfassung

Das Strömungsfeld der Querstrahlbrenner läßt sich aus dem Zusammenwirken der Impulskräfte von Brennstoffstrahl und Grundströmung erklären. Das Mischungsfeld weist einige Unterschiede von dem der ungestörten Freistrahler auf. Durch die seitliche Anströmung des Strahlanfangs und das Nachlaufgebiet auf der Abströmseite wird der Stoffaustausch verbessert, ebenso, wenn auch in geringerem Umfang, durch das Zusammentreffen der beiden Strahlen. Andererseits ist nach Vereinigung der Teilstrahlen die Mischung mit der Umgebungssubstanz schlechter als sie bei getrennt bleibenden Strahlen wäre.

Die Vergleichsmessungen zeigten, daß eine Verkürzung der Flamme am besten durch hohen Impuls der Brennstoffstrahlen erreicht wird, Mehrfachdüsen haben einen viel geringeren Effekt, da sich ihre Teilstrahlen schnell vereinigen. Die Steigerung des Anstellwinkels führte überraschend zu einer Verlängerung der Flamme. Der Zusatzimpuls, den ein Treibmedium liefert, wird zweckmäßiger durch Steigerung des Gasdruckes erreicht.

Tabelle 1. Wahre Flammenlänge in Abhängigkeit von der Brenneranordnung

Anordnung	wahre Flammenlänge (1,2·mittlere Länge) in m
Rechnung Freistrahler	5,3
Modell, Grundeinstellung	4,6
vierfaches Impulsverhältnis	2,9
Doppeldüse	4,3
60° Anstellwinkel	≈ 6

Die wichtigsten Zahlenwerte sind aus der vorstehenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Der Autor dankt Herrn L. BIEBER für den Aufbau des Modells und die Durchführung der Messungen.

6. Literatur

- [1] PATRICK, M. A.: Experimental investigation of mixing and flow in a round, turbulent jet injected perpendicularly into a main stream. Fuel Soc. J., Univ. Sheffield **16** (1965) S. 46 – 61.
- [2] RICOU, F. P. und SPALDING, D. B.: Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. J. Fluid Mech. (1961) S. 21 – 32.
- [3] LENZE, B.: Turbulenzverhalten und Ungemischtheit von Strahlen und Strahlflammen. Univ. Karlsruhe, Fak. f. Chemieingenieurwes., Dr.-Ing.-Diss. v. 10. 7. 1971.
- [4] GÜNTHER, R. und SIMON, H. D.: Spectral density functions and Eulerian scale of emission in turbulent diffusion flames. 12th Symposium (Internat.) on Combustion, Poitiers (Frankreich) 1968. S. 1069 – 1079.
- [5] LIEHN, W.: Eigenkarburierung von Erdgasflammen bei Primärluftzusatz. Glastechn. Ber. **45** (1972) Nr. 3, S. 85 bis 91.
- [6] LEBLANC, B. und MARAVAL, L.: Utilisation du gaz naturel dans l'industrie: Les tuyères mises au point par G.E.F.G.N. Gaswärme Internat. **20** (1971) S. 458 – 464.