

# Messung der Zündgeschwindigkeit strömender Gas-Luft-Gemische

Von Werner Unger.

Nachdem man die große Bedeutung des richtigen Ablaufes der Verbrennung für den Betrieb eines Verbrennungsmotors erkannt hatte, begann ein eingehendes Studium der Verbrennungsvorgängen von Luft-Gas-Gemischen. Zwei Methoden wandte man hauptsächlich zu Zündgeschwindigkeitsmessungen von Gasgemischen an:

1. die dynamische Methode bei laminaren und in letzter Zeit auch bei turbulenten Strömungsverhältnissen des Frischgasstromes und
2. die statische Methode, bei der die Wanderungsgeschwindigkeit der Flamme in einem ruhenden Gasgemisch beobachtet wird.

Eine Reihe von Forschern hat die auftretenden Fehlermöglichkeiten der dynamischen Methode untersucht. Sie zeigten, daß Brennerweite und Brennermaterial wie auch die Strömungsgeschwindigkeit des Frischgases, solange diese laminar bleibt, keinen Einfluß auf die normale Zündgeschwindigkeit ausüben. Die dynamische und die statische Methode müßten die gleichen Ergebnisse liefern, da es für den Vorgang der Verbrennung gleichgültig ist, ob die Brennoberfläche im Raume ruht und das Gas bewegt wird oder umgekehrt. Die Voraussetzung dafür ist, daß bei der Verbrennung im Rohr die Flamme exakt die Gestalt einer Ebenen senkrecht zur Rohrachse annimmt. Diese Bedingung läßt sich nicht verwirklichen. Die Folge davon ist, daß die Meßwerte der beiden Methoden weitgehende Unterschiede aufweisen. Diese Abweichungen bei der statischen Methode könnte man damit erklären, daß turbulente Strömungen in der Flamme eine Beschleunigung der Verbrennung zur Folge haben.

Der Einfluß der Turbulenz auf die Zündgeschwindigkeit eines Gasgemisches hat G. Damköhler<sup>1)</sup> untersucht. Als Versuchsgrundlage diente

<sup>1)</sup> G. Damköhler: Der Einfluß der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasgemischen. Jb. 1939 d. dt. Luftfahrtforschg Bd II (Triebwerk) S. 3.

ihm die Bunsenbrennermethode. Dankkühler unterscheidet beim Flammenbild der laminar und der turbulent angeströmten Bunsenflamme eine äußere und eine innere Begrenzungsfläche des Brennkogels. Die innere Begrenzungsfläche wird als der geometrische Ort der schnellsten und die äußere als der geometrische Ort der langsamsten Verbrennung definiert. Bei der Untersuchung eines Propan-Butan-Sauerstoff-Gemisches wurden für den inneren Kegel der Bunsenflamme maximale Zündgeschwindigkeiten von rund 3 m/sec bei laminaren Strömungsverhältnissen und rund 300% größere Werte bei Reynoldsschen Zahlen von 17.000 erhalten. Die Zündgeschwindigkeiten, die sich aus den äußeren Begrenzungsflächen der Brennkogel ergeben, liegen für laminare und auch turbulente Strömungsverhältnisse in derselben Größenordnung.

Im Jahre 1937 gab W. Nusselt die Anregung zu der folgenden Arbeit, welche die Gesetzmäßigkeiten klären soll, nach der sich die Zündgeschwindigkeit eines strömenden Leuchtgas-Luft-Gemisches mit der Turbulenz des Frischgasstromes ändert.

### Meßverfahren

Das von mir angewandte Meßverfahren arbeitet nach folgendem Prinzip:

Durch ein Rohr von gegebenem Durchmesser ströme ein Luft-Gas-Gemisch von bekannter Zusammensetzung und bekannter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit. Nach Verlassen des Rohres tritt das Gas frei in die Atmosphäre aus. Innerhalb des Rohres wird das Luft-Gas-Gemisch durch einen elektrischen Funken gezündet. Es entstehen zwei Flammenfronten. Eine Flammenfront bewegt sich gegen den Frischgasstrom, die andere in Richtung des Frischgasstromes. Die zweite Flamme, die in Strömungsrichtung brennt, bewegt sich — absolut zur Rohrwand — stets nach dem offenen Rohrende. Ihre Geschwindigkeit absolut zum Rohr ist additiv aus folgenden Größen zusammengesetzt:

1. der Frischgasgeschwindigkeit,
2. der Ausdehnungsgeschwindigkeit der Abgase und
3. der Verbrennungsgeschwindigkeit des Luft-Gas-Gemisches.

Da die Ausdehnungsgeschwindigkeit der Abgase eine schwer bestimmbare Größe ist, wurde die zweite Flammenfront zur Messung der Zündgeschwindigkeit nicht herangezogen, sondern nur die entgegengesetzt zum

Frischgasstrom wandernde Flammentront. Deren Geschwindigkeit relativ zur Rohrwand setzt sich nur aus der Frischgasgeschwindigkeit und der Flammgeschwindigkeit zusammen. Beides sind Größen, die mittelschwer zu erfassen sind.

### Versuchseinrichtung

Beim Entwurf der Versuchseinrichtung für das beschriebene Meßverfahren waren folgende Bedingungen zu erfüllen:

1. Geschwindigkeit und Zusammensetzung des Luft-Gas-Gemisches müssen bekannt und gleichbleibend sein.
2. die Frischgasgeschwindigkeit muß in weiten Grenzen geändert werden können.

Der prinzipielle Aufbau der Versuchseinrichtung ist in der ersten Abbildung gezeigt.

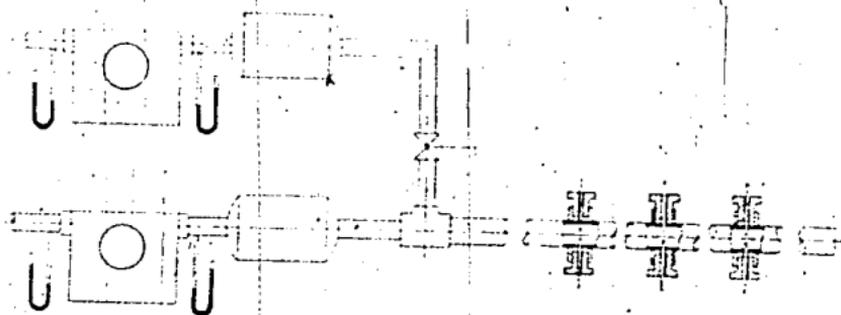


Abb. 1  
Versuchseinrichtung

Verbrennungsluft und Leuchtgas strömten getrennt durch je einen Gasmesser und Ausgleichsbeutel nach der Mischkammer und von hier aus durch das Versuchsrohr in die Atmosphäre. Die Untersuchungen erstreckten sich auf drei Röhre von 20, 30 und 40 mm Durchmesser, wobei das Rohr von 20 mm Durchmesser horizontal und vertikal und die anderen senkrecht angeordnet waren. In jedem Falle wurde glattes, nahtlos gezogenes Präzisionsstahlrohr verwendet.

Zur Messung der Flammengeschwindigkeit im Rohr diente die Ionisationsmethode. Mit Hilfe von zwei in das Rohr eingeführten Ionisationsstrecken, einem Zweistrahl-Kathodenzillographen und einer Ablaufkamera wurde die Wanderungsgeschwindigkeit der Flamme im Rohr

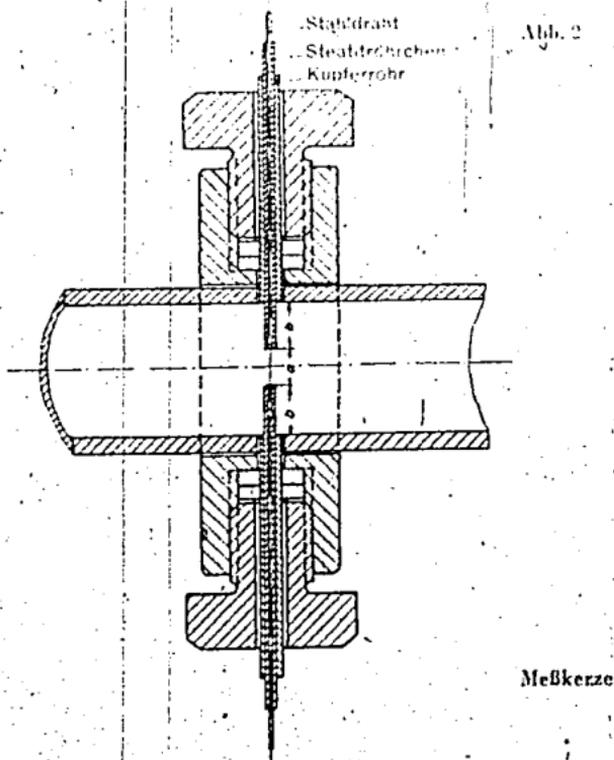
registriert. Durch die Ionisationsstrecken wird das Versuchrohr in folgende Abschnitte eingeteilt:

1. Die Beruhigungsstrecke zwischen Meßkammer und erster Meßkerze von mindestens 150 mm Länge.
2. die Meßstrecken begrenzt durch zwei Meßkerzen
3. die Anlaufstrecke zwischen Meß- und Zündkerze und
4. die Auslaufstrecke zwischen Zündkerze und Rohrende.

Eingehende Vorversuche dienten zur Klärung folgender Punkte:

1. Ausbildung der Meß- und Zündkerze und ihre Lage zueinander im Rohr.
2. Länge der Anlauf-, Meß- und Auslaufstrecke.
3. Abhängigkeit der Flammgeschwindigkeit von der durchlaufenden Rohrlänge.

Die Ausbildung der Meß- und Zündkerze ist in der nächsten Abbildung dargestellt.



Ein 0,5 mm starker Stahldraht war in ein Steatitröhrchen von 1 mm Außendurchmesser eingekittet. Zur Erzielung der mechanischen Festigkeit der sehr empfindlichen Steatitröhrchen wurde dieses wieder von einem Kupferrohr umschlossen. Durch zwei diagonal zu entgegengesetzten Bohrungen in der Rohrwand führte man die Ionisationsstrecken in das Rohrinnere. Um stets sicher zu sein, daß der Ionisationsstrom nur bei Auftreten der Flamme zwischen den isolierten Elektroden auftritt, war der Abstand der beiden Elektroden  $a$  stets kleiner gehalten als der Abstand Meßelektrode zur Rohrwand  $b$ .

Diese Anordnung hat eine Querschnittsverengung von 1% beim Rohr von 20 mm Durchmesser, 5% bei 30 mm und 3% bei 40 mm Rohrdurchmesser zur Folge. Bei turbulenten Geschwindigkeiten wird der Einfluß der Störung der Rohrströmung durch die Steatitröhrchen auf die Zündgeschwindigkeit geringer sein als bei laminaren Geschwindigkeiten. Aus diesem Grunde wurde bei unterkritischen Frischgasgeschwindigkeiten noch eine zweite Anordnung angewandt. Die Meßelektrode bestand aus einem 1 mm starken NCT-3 Stahldraht, der in ein Sinterkorundröhrchen von 3 mm Außendurchmesser eingekittet war. Das Sinterkorundröhrchen schnitt mit der Innenwand des Rohres ab. Die zugefeilte Spitze des Stahldrahtes ragte 3 mm in das Rohrinnere hinein. Als Masselektrode diente die Rohrwand. Vergleichversuche mit den beiden Meßkerzen bei Frischgasgeschwindigkeiten von 2,3 und 4,9 m/sec im Rohr von 20 mm Durchmesser und von 2,0 und 3,6 m/sec im Rohr von 40 mm Durchmesser zeigten keinerlei Unterschiede der gemessenen Zündgeschwindigkeiten und auch keinerlei Unterschiede in bezug auf den zeitlichen Verlauf des Ionisationsstromes.

Die Länge der Anlaufstrecke (Zündkerze bis erste Ionisationsstrecke) von rund 10 Durchmessern erwies sich am günstigsten. Der Abstand der Ionisationsstrecken betrug 200 mm.

Bei Auswertung der Versuche wurde aus dem Oszillographendiagramm die Geschwindigkeit der Flamme innerhalb der Anlauf- und Meßstrecke errechnet und daraus der Mittelwert gebildet. Die Unterschiede der Flammengeschwindigkeiten lagen innerhalb der möglichen Versuchsgenauigkeiten und ließen auf keinerlei Zu- oder Abnahme der Flammgeschwindigkeit mit der Rohrlänge schließen.

### Versuchsergebnisse

Die Zusammensetzung des mit fruchten Leuchtgases wurde in einer Reihe von Orsat-Analysen festgestellt. Sie schwankte in folgenden Grenzen:

CO <sub>2</sub> .....	3,6	1,0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> .....	1,6	1,9
O <sub>2</sub> .....	0,3	0,3
CO .....	16,2	19,5
H <sub>2</sub> .....	50,2	53,3
CH <sub>4</sub> .....	18,8	20,5
N <sub>2</sub> .....	1,7	3,0

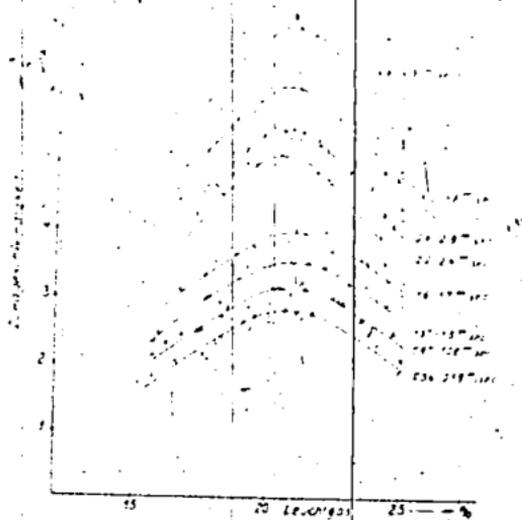
Das stöchiometrische Gemisch lag im Mittel bei 24% Gas. Bei Aufnahme einer Versuchsreihe wurde die Luftmenge konstant gehalten und durch Zusatz von verschiedenen Leuchtgasmengen die Zusammensetzung des Luft-Gas-Gemisches verändert. Die Frischgasgeschwindigkeit — als mittlere Geschwindigkeit aus Volummessung und Rohrdurchmesser berechnet — blieb dadurch nicht konstant, sondern nahm mit zunehmendem Gasgehalt ebenfalls zu. Bei der Erhöhung des Gasgehaltes von 16% Gas im Gemisch auf 26% vergrößerte sich die Frischgasgeschwindigkeit um 13,6%. Diese Streuung der Frischgasgeschwindigkeit hob man dadurch auf, daß man mit Hilfe von mehreren Versuchsreihen auf eine Frischgasgeschwindigkeit extrapolierte.

Als Beispiel für die Versuchsergebnisse sind in der folgenden Abbildung diejenigen Zündgeschwindigkeiten herausgegriffen, die mit einem Rohr von 20 mm Durchmesser in horizontaler Lage erhalten wurden.

In dieser Abbildung ist die Zündgeschwindigkeit über der prozentualen Gemischzusammensetzung für Frischgasgeschwindigkeiten von 0,54 bis 4,9 m/sec aufgetragen.

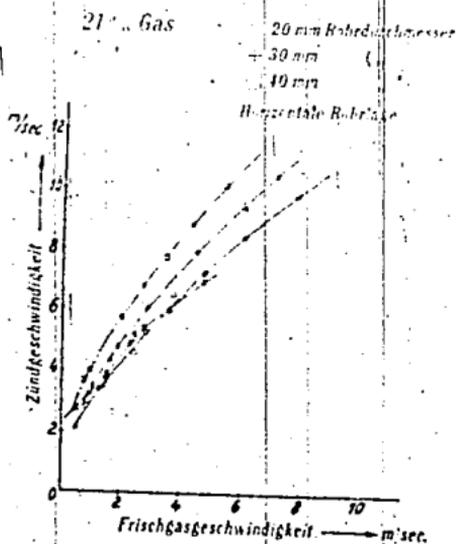
Zwei Gruppen von Kurvenscharen verschiedenen Charakters sind zu unterscheiden. Bei Frischgasgeschwindigkeiten unterhalb von 2,2 m/sec ist der Abfall der Kurvenäste vom Scheitelpunkt aus flacher als bei denen oberhalb von 2,2 m/sec. Dies läßt auf eine Verengung der Zündgrenzen mit zunehmender Frischgasgeschwindigkeit schließen. Der Höchstwert der Zündgeschwindigkeit für eine Frischgasgeschwindigkeit liegt bei 21% Leuchtgas im Gemisch, d. h. in Nähe der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung. Die geringe Verschiebung des Maximums der einzelnen Kurven zueinander ist auf eine Änderung der Leuchtgaszusammensetzung zurückzuführen, da die Versuche zum Teil an verschiedenen Tagen gefahren wurden.

Zündgeschwindigkeit in  
 Abh. von der Gemischzu-  
 sammensetzung für ein  
 Versuchsrohr von 20 mm  
 Durchmesser in horizon-  
 taler Lage



Die Versuchsergebnisse mit Röhren von 20, 30 und 40 mm Durchmes-  
 ser in vertikaler Lage zeigen die gleiche Charakteristik wie die auf die-  
 ser Abbildung. Sie sind aus diesem Grunde nicht einzeln vorgeführt,  
 sondern in der nächsten Abbildung in einer Gesamtdarstellung vorhandens

Abb. 4a



Zündgeschwindigkeit in  
 Abh. von der Frischgas-  
 geschwindigkeit

Abb. 4b



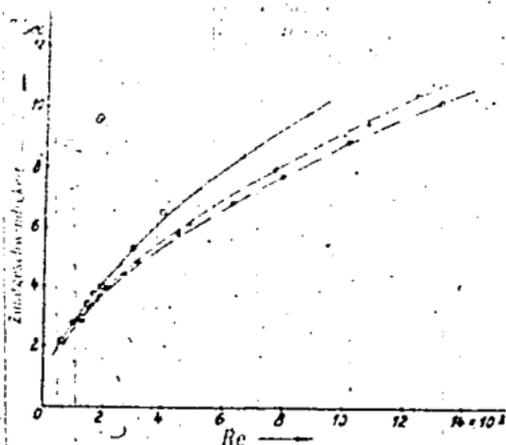
Zündgeschwindigkeit in  
Abh. vom Rohrdurchmesser  
mit dem Parameter einer  
Frischgasgeschwindigkeit

Die Abbildung 4a stellt die bei vertikaler Rohrlage gemessenen Zündgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Frischgasgeschwindigkeit für eine Gemischzusammensetzung von 21% Gas im Gemisch dar. Mit zunehmenden Frischgasgeschwindigkeiten und Rohrdurchmessern erhöht sich auch die Zündgeschwindigkeit. Bei einem Rohrdurchmesser von 10 mm und 5,6 m/sec Frischgasgeschwindigkeit erreicht die Zündgeschwindigkeit einen Wert von rund 10 m/sec. Die Abhängigkeit der Zündgeschwindigkeit von den Rohrdurchmessern mit dem Parameter einer Grundgeschwindigkeit ist eine geradlinige, wie Abbildung 4b zeigt.

Im unteren Teil von Abbildung 4a sind auch die Versuchsergebnisse für ein Rohr von 20 mm Durchmesser in horizontaler Rohrlage dargestellt. Bei kleinen Frischgasgeschwindigkeiten liegt die Zündgeschwindigkeit bei waagerechter Bewegungsrichtung der Flamme etwas höher als bei vertikaler Bewegungsrichtung. Bei Frischgasgeschwindigkeiten über 3,5 m/sec liegt dagegen die Zündgeschwindigkeit bei horizontaler Rohrlage tiefer als bei vertikaler. Die Unterschiede der Zündgeschwindigkeit sind durch Schwerkraftwirkungen bedingt, die eine asymmetrische Verzerrung der Flamme bei horizontaler Bewegungsrichtung der Flammenfront zur Folge haben. Im Verlauf der Ausführungen wird darauf noch näher eingegangen.

Zum Vergleich der Versuche mit verschiedenen Rohrdurchmessern und zur Klärung der Frage, ob die Zündgeschwindigkeit direkt von der Turbulenz des Frischgasstromes abhängt, wurde die Zündgeschwindigkeit

Abb. 5



Zündgeschwindigkeit in  
Abb. von der Reynoldsschen Zahl

für eine Gaszusammensetzung von 21 % Gas im Gemisch für vertikale Rohrlagen über der Reynoldsschen Zahl aufgetragen.

Man entnimmt dem Schaubild zunächst die starke Zunahme der Zündgeschwindigkeit mit der Reynoldsschen Zahl. Der stärkere Anstieg der Zündgeschwindigkeit unterhalb der kritischen Reynoldsschen Zahl und die schwächere Zunahme oberhalb zeigt, daß die Zündgeschwindigkeit durch die Änderung des Strömungsgesetzes im Rohr beeinflusst wird. Weiterhin zeigt dieses Schaubild, daß die Zündgeschwindigkeit nicht von der Reynoldsschen Zahl, sondern vom Rohrdurchmesser und von der Frischgasgeschwindigkeit abhängig ist. Wäre eine direkte Abhängigkeit der Zündgeschwindigkeit von der Reynoldsschen Zahl vorhanden, so müßten die Versuchsergebnisse für alle Rohrdurchmesser von einem Linienzug aufgenommen werden.

Wie aber die Versuchsergebnisse zeigen, nimmt die Zündgeschwindigkeit mit wachsenden Rohrdurchmessern ab. Der Grenzfall wäre ein unendlich weites Rohr, d. h. eine unendlich ausgedehnte Gasmasse mit einer Ebenen als Brennfläche. Die Flamme würde sich dann mit der normalen Zündgeschwindigkeit gegen das Frischgas hin bewegen.

Aus einer Auftragung der Zündgeschwindigkeit über der Frischgasgeschwindigkeit im logarithmischen Maßstab ersah man, daß sich die Zündgeschwindigkeit nach einer Potenzformel ändert.

Es konnten zwei Gleichungen für die vertikale Strömung im Rohr ermittelt werden.

Für laminare Frischgasgeschwindigkeiten können die Versuchsergebnisse für alle Rohrdurchmesser durch die Gleichung

$$z = 0,25 \cdot d \cdot 2,45 \cdot r$$

und für turbulente Frischgasgeschwindigkeiten durch die Gleichung

$$z = 0,25 \cdot d \cdot 1,96 \cdot r^{0,55}$$

dargestellt werden. Darin bedeuten  $z$  die Zündgeschwindigkeit,  $d$  der Rohrdurchmesser und  $r$  die Frischgasgeschwindigkeit. Der Exponent mit der Frischgasgeschwindigkeit als Basis nimmt beim Überschreiten der kritischen Reynoldsschen Zahl nach dem Gebiet turbulenter Strömung von 0,189 auf 0,595, d. h. um rund 21% zu.

Man ersieht aus diesen beiden Formeln, deren Geltungsbereich abgegrenzt ist durch den Punkt, in dem der Umschlag vom laminaren zum turbulenten Zustand der Strömung erfolgt, daß mit einer Änderung des Strömungsgesetzes auch eine Änderung der Gesetzmäßigkeit der Verbrennung im Rohr verbunden ist.

Die bis jetzt besprochenen Messungen sind aus Versuchen gewonnen, bei denen die Flamme in den Frischgasstrom zurückschlug. Bei Versuchen mit Frischgasgeschwindigkeiten unter 5,5 m/sec beim horizontalen Rohr und unter 9 m/sec beim vertikalen Rohr mit 20 mm Durchmesser war dies stets der Fall. Überschritt man diese Geschwindigkeitsgrenze, so kam man in ein labiles Gebiet, in dem die Flamme zum Teil zurückschlug, zum Teil vom Frischgasstrom mitgenommen wurde oder auch auf einer Strecke von rund 10 Zentimetern hin und her pendelte. Erst bei Grundgeschwindigkeiten über 10 m/sec trug der Frischgasstrom stets die Flamme nach dem offenen Rohrende. Bei diesen hohen Frischgasgeschwindigkeiten führten die Untersuchungen zu keinen klaren und gut reproduzierbaren Ergebnissen. Die Werte der aufgenommenen Zündgeschwindigkeiten für eine Grundgeschwindigkeit zeigten Unterschiede bis zu 100%. Wegen dieser hohen Streuungen konnte auch eine einwandfreie Abhängigkeit der Zündgeschwindigkeit von der Gaszusammensetzung nicht erkannt werden.

Das Auftreten der Streuungen kann nur durch die Flamme selbst bedingt sein. Bei einer stabilen und bei gleichen Versuchsbedingungen stets wiederkehrenden Flammenfront sind Streuungen der Flammen-

Geschwindigkeiten bis zu 100' nicht möglich. Ist die Flammenfront aber nicht stabil, so sind derartige Strömungen leicht erklärlich.

Man könnte nun vermuten, daß der Grund für das Auftreten einer unstablen Flammenfront die bei höheren Reynold'schen Zahlen im Frischgas vorhandene Turbulenz ist. Wie aber die Versuche mit Rohrdurchmessern von 30 und 40 mm zeigten, sind Meßwerte mit geringen Strömungen erreichbar, auch bei Reynold'schen Zahlen, die einer höheren Grundgeschwindigkeit als 10 m/sec bei 20 mm Rohrdurchmesser entsprechen.

Die Unstabilität der Flammenfront wird nicht durch die Turbulenz im Frischgas hervorgerufen, sondern wird von der Dynamik der Flammenfortpflanzung bedingt sein.

Was für Strömungen treten nun bei der Verbrennung im Rohr auf?

Die folgenden Ausführungen sind qualitativ zu werten.

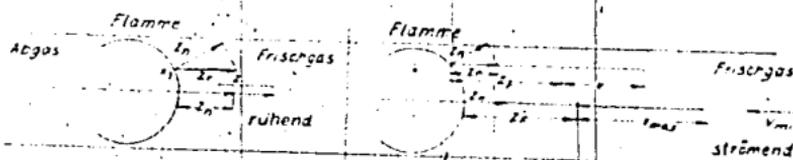


Abb. 6  
Strömungsverhältnisse an der Flamme

In einem zylindrischen Rohr befindet sich ein in Ruhe befindliches Gasgemisch, das am offenen Rohrende zur Entzündung gebracht wird. Es bildet sich eine zur Rohrachse symmetrisch gewölbte Flammenfront aus, die sich mit einer Geschwindigkeit  $z$  durch das Rohr bewegt, die größer ist als die normale Zündgeschwindigkeit des vorhandenen Frischgases. In der Rohrmitte, wo die Brennfläche senkrecht zur Rohrachse steht, tritt die normale Zündgeschwindigkeit  $z_n$  auf. Da die effektive Flammengeschwindigkeit  $z$  größer als die normale Zündgeschwindigkeit  $z_n$  ist, muß, um die Stabilität der Flammenform aufrechtzuerhalten, eine zusätzliche Geschwindigkeit  $v_{zu}$  auftreten, die den Unterschied der beiden Geschwindigkeiten aufhebt. An einer anderen Stelle der Brennfläche ist die resultierende Zündgeschwindigkeit  $z_r$  größer als die normale Zündgeschwindigkeit  $z_n$ , aber kleiner als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Flamme. Der Unterschied der beiden Geschwindigkeiten wird durch eine zusätzliche Geschwindigkeit kompensiert, die in diesem Falle

kleiner als die in der Rohrmittle ist. Es gibt nun eine Stelle, an der Flammengeschwindigkeiten und resultierende Zündgeschwindigkeit gleich groß sind, d. h. es tritt keine axiale Frischgasströmung auf.

Noch weiter dem Rande zu wird die resultierende Zündgeschwindigkeit größer als die Flammengeschwindigkeit  $z_f$ , womit die zusätzliche Frischgasströmung negativ wird, d. h. Frischgas strömt nach der Brennoberfläche hin.

Bei dem in dieser Arbeit vorliegendem Melbverfahren strömt das Frischgas mit einer aufgezwungenen Geschwindigkeit gegen die Brennoberfläche, und diese bewegt sich absolut zur Rohrwand nach der Frischgasseite. Wie kann eine derartige Flammenfront entstehen? Betrachtet man nun wieder zuerst die Flamme in der Rohrmittle, wo sie senkrecht zur Rohrachse steht. An dieser Stelle tritt die normale Zündgeschwindigkeit  $z_n$  auf. Der Flamme entgegen strömt das Frischgas mit der maximalen örtlichen Geschwindigkeit  $v_{max}$ . Damit sich nun die Flamme mit der Geschwindigkeit  $z_f$  gegen den Frischgasstrom bewegen kann, muß eine zusätzliche Frischgasströmung von der Größe

$$v_{zu} = z_f - z_n = (-v_{max})$$

auftreten.

An einer Stelle  $x_1$  ist die resultierende Zündgeschwindigkeit  $z_{zu}$ . Wenn  $z_f < z_f$  ist, tritt eine zusätzliche Geschwindigkeit von der Größe

$$v_{zu_1} = z_f - z_{zu} = (-v)$$

auf ( $v$  ist die Frischgasgeschwindigkeit an der jeweils betrachteten Stelle).

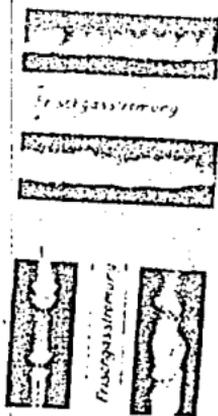
Da  $z_f > z_n$  und  $v < v_{max}$  ist, wird auch  $v_{zu_1} < v_{zu}$ .

Beim weiteren Fortschreiten auf der Flammenoberfläche nach dem Rohrrande zu wird  $v_{zu}$  kleiner. Den Wert Null erreicht  $v_{zu}$  an der Stelle, an der  $z_f - z_f = (-v)$  wird, und wird negativ, wenn  $z_f - z_f > (-v)$  ist.

Es treten also beim strömenden Gemisch ähnliche Zusatzgeschwindigkeiten im Frischgas auf wie beim stehenden Gemisch.

Um einen Einblick in die Verhältnisse an der Flamme zu erhalten, wurde diese photographiert.

Diese Abbildung zeigt Aufnahmen der Flammenfront bei horizontaler (Bild a und b) und vertikaler (Bild c und d) Bewegungsrichtung der Flamme. Aufnahme a erfolgte bei einer laminaren Frischgasgeschwin-



Flamme im horizontalen und vertikalen Rohr

digkeit von 0,75 m sec und einer Gaszusammensetzung mit 20 % Gas im Gemisch. Aufnahme b stellt die Flamme bei einer Grundgeschwindigkeit von 2,5 m sec (turbulente Strömungsverhältnisse) und einem Gemisch mit 20,8 % Gas dar.

Die bei laminaren Strömungsverhältnissen im Rohr aufgenommene Flamme behält ihre Form bei, im Gegensatz zu der Flammenfront bei turbulenten Strömungsgeschwindigkeiten, deren Oberfläche zerklüftet war.

Beide Flammen haben aber eines gemeinsam. Sie sind verzogen und nach vorn gekippt. Sie sind unsymmetrisch in bezug auf die Rohrachse.

Bei vertikaler Bewegungsrichtung der Flamme ist diese symmetrisch zur Rohrachse. Herrscht laminare Strömung im Rohr (Abbildung 7c), so ist die Flammenoberfläche zusammenhängend. Bei turbulenten Strömungsverhältnissen (Abbildung 7d) ist dagegen die Flammenfront zerklüftet, behält aber im ganzen ihre Symmetrie zur Rohrachse bei.





## Vortragende und Ausspracheredner

Mitglieder der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung

- Busemann, Adolf, Professor Dr.-Ing., Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig, Postfach 390.
- Danköhler, Gerhard, Dr. habil., Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig, Postfach 390.
- Fraunherz, Hans, Dr. habil., I. G. Farbenindustrie A. G., Ludwigshafen a. Rh.
- Jost, Wilhelm, Professor Dr. sc. nat., Universität Leipzig, Leipzig, Linnéstr. 2.
- \*Kamm, Wunibald, Professor Dr.-Ing., Technische Hochschule Stuttgart, Stuttgart-Untertürkheim, Martin-Schrenk-Weg 9.
- Lindner, Werner, Professor Dr.-Ing., Technische Hochschule, Breslau.
- von Müffling, Ludwig, Dr. phil., I. G. Farbenindustrie A. G., Ludwigshafen a. Rh.
- Penzig, Fritz, Dipl.-Ing., I. G. Farbenindustrie A. G., Ludwigshafen a. Rh.
- \*von Philippovich, Alexander, Dr. phil., Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V., Berlin-Adlershof.
- Rögner, Heinz, Dr. phil., Universität Leipzig, Leipzig, Linnéstr. 2.
- Scheuermeyer, Max, Dr.-Ing., Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V., Berlin-Adlershof.
- \*Schmidt, Ernst, Professor Dr.-Ing., Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring, Braunschweig, Postfach 390.
- Schmidt, Fritz A. F., Professor Dr.-Ing., Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V., Berlin-Adlershof.
- Teichmann, Hermann, Dr.-Ing., Potsdam, Spandauer Str. 26.
- Unger, Werner, Dipl.-Ing., BMW-Flugmotorenbau GmbH., München 13, Lerchenauer Str. 76.
- von Weber, Ulrich, Dr. phil., Universität Leipzig, Leipzig, Linnéstr. 2.
- Zeise, Heino, Dr. phil., Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V., Berlin-Adlershof.