

Beiträge zur Frage der Flammengeschwindigkeit

Von Dr. SACHSSE, Oppau

Der entscheidende Einfluß der Flammengeschwindigkeit auf alle Verfahren der Energieerzeugung durch Wärme ist bekannt. Beim Benzin- und Dieselmotor, bei Gas- und Staubfeuerungen sind diese Dinge vielfach untersucht und diskutiert worden. Ich verweise in diesem Zusammenhange auf ausführlichen Untersuchungen von K. Rummel¹⁾ sowie auf die umfassende Monographie von Jost²⁾. Wir haben uns nun in Oppau in unserer Gruppe Synthesegasversuche seit einer Reihe von Jahren mit ähnlichen Problemen befaßt, aber nicht vom Gesichtspunkt des Energieingenieurs und Wärmefachmannes, sondern als Chemiker. Die Entwicklungsarbeiten an zwei chemischen Verfahren zur Gewinnung von Synthesegas haben uns zu vielfachen Studium von Flammen veranlaßt, in Klein- und in Großversuchen waren mannigfache Einzelheiten zu klären. Im Anschluß an diese Arbeiten haben wir dann, ich möchte sagen aus wissenschaftlicher Neugier, einige grundsätzliche Fragen der Flammengeschwindigkeit in experimentellen Untersuchungen weiterstudiert. Ich will Ihnen im folgenden zunächst einen Abriss der technischen Verfahren geben, bei denen die Flammengeschwindigkeit eine Rolle spielt, und ich will Ihnen dann anschließend im zweiten Teil meines Referates über unsere allgemeineren Untersuchungen zur Flammengeschwindigkeit berichten. — Die Arbeiten wurden neben anderen Aufgaben während einer Reihe von Jahren in gemeinschaftlicher Arbeit ausgeführt. Daran beteiligt waren die Herren Bartholomä, Losbath, Moritz und Hennesthal und von der Technischen Abteilung die Herren Altstard und Schiffer.

A. Verfahren, bei denen die Flammengeschwindigkeit eine Rolle spielt

1. Das Oppauer Sauerstoffverfahren zur Gewinnung von Synthesegas

Bei diesem Verfahren handelt es sich darum, kohlenwasserstoffhaltige Gase, wie z. B. Kokereigas, mit Sauerstoff zu einem Gemisch von CO und H₂ umzusetzen, etwa nach der Gleichung:



Diese Gleichung stellt eine Bruttoleichung für den Gesamtumsatz dar, in Wirklichkeit arbeitet man sozusagen in zwei Schritten. In Kokereigas, das im Wärmeaustausch auf etwa 600°C angewärmt ist, wird Sauerstoff, oder auch Luft-Sauerstoff-Gemisch, eingebracht. Dabei setzt sich schon ein Teil der KW um, und das Gasgemisch erwärmt sich weiter auf etwa 1300°C. Diese Gase gehen anschließend über einen Nickel-Magnesia-Kontakt, an dem sich die restlichen KW mit Wasserdampf unter Wärmeverbrauch in CO und H₂ umwandeln. Dabei fällt die Temperatur auf etwa 950°C. Bild 1 zeigt Ihnen die verwendeten Reaktionsöfen bei den verschiedenen Entwicklungsstufen des Verfahrens. Der Ofen mit der seitlich angebrachten Brennkammer und tangentialer Gaseinführung entspricht dem letzten Stand, er ist vielfach ausgeführt, und zur Zeit laufen in Waldenburg, Linz, Heydebreck und Oppau 13 Systeme mit einer Gaserzeugung über 200000 m³/h, und weitere sind im Bau. In unserem Zusammenhange hier interessiert uns die Brennkammer, die Sie in Bild 2 dargestellt finden. Der Sauerstoff wird zentral in der gleichen Richtung wie das Gas, aber mit größerer Geschwindigkeit strömend, zugegeben. Das Ziel ist, eine möglichst gleichmäßige und vollständige Verbrennung im Brennraum zu erzielen. Hier tritt ein Problem, das nahezu allen technischen Verbrennungsprozessen gemein ist, auf, daß nämlich die Gase erst brennen können, wenn sie gemischt sind. Um diese Mischung zu verbessern, haben wir dem Sauerstoff vor dem Austritt aus der Düse durch Einbau von Leitblechen in die Düse einen kräftigen Drall erteilt. Man erzielt auf diese Weise eine Mischung nach 1½ Durchmessern des äußeren Brennrohres, das ist hier nach 100 cm. Was das Mischen anbelangt, kann man auch des guten zuziele tun. Mischt man zu eifrig, so reißt die Flamme ab und geht aus. Das hat seinen Grund darin, daß bei vorliegendem Verfahren mit starkem Sauerstoffüberschuß gearbeitet wird, man will ja nur einen kleinen Teil des Gases verbrennen, und in diesem Sauerstoffüberschußgebiet ist die Flammengeschwindigkeit geringer als im Bereich der vollständigen Verbrennung. Durch zu gute Mischung beseitigt man daher zu schnell die Bezirke hohen Sauerstoffgehaltes und damit großer Flammengeschwindigkeit. Analoge Verhältnisse liegen immer vor, wenn man mit einer von $\lambda = 1$ stark abweichenden Luftzahl arbeitet. Das ist z. B. der Fall bei Umwälzfeuerungen, die Luft- oder Rauchgasüberschuß haben. Ich will noch einige Durchsatzzahlen nennen: durch ein Brennrohr von 700 mm Ø strömen etwa 23000 m³/h mit einer Effektivgeschwindigkeit von 85 m/sec. Die Feuerungstechniker haben uns seinerzeit abgeraten, diesen Ofen zu bauen, da die Beanspruchung zu groß ist, aber da die Gase sauber und staubfrei sind, haben wir bis jetzt bei den großen Bela-

stungen keine Anstände gehabt. Über die spezifische Brennraumbelastung gibt Tabelle 1 Aufschluß; ich werde

| | | |
|---|--------|-------------------------------------|
| Technische Feuerungen a) Generatorgas | ~ 1,5 | 10 ⁶ kcal/m ³ |
| b) Kokereigas | ~ 3 | " |
| Synthesegasspaltöfen | 12 | " |
| Acetylenbrennerkammer | 60 | " |
| Benzinmotor | 30-70 | " |
| Bunsenbrenner, gesamter Raum, den die Flamme ausfüllt | ~ 530 | " |
| Bunsenbrenner, Flammenhaut, in der sich die chem. Reaktion abspielt | ~ 7000 | " |
| Wärmeleistung der Flammenhaut in m ³ . | 2 | 10 ⁶ kcal/m ³ |

Tabelle 1. Spezifische Belastungen von Feuerräumen

auf diese Zahlen in späterem Zusammenhange noch zurückkommen; nur auf einen Umstand möchte ich schon hier hinweisen: man sieht, daß es noch viel höhere Verbrennungsleistungen gibt, als sie hier bei den Spaltöfen verwirklicht sind. Das ist ein in die Augen springender Beweis für die bekannte Tatsache, daß das Mischen viel, viel länger dauert, als die chemische Reaktion.

2. Das Acetylenverfahren

Bei dem eben geschilderten Verfahren war die Flammenverbrennung ein wichtiges Hilfsglied; bei dem Acetylenverfahren, von dem ich Ihnen jetzt berichten will, spielt sie die entscheidende Rolle, so ausschlaggebend, daß sie in den Patentschutz dieses Verfahrens eingegangen ist.

Seit der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts ist es bekannt, daß man aus Methan Acetylen erhalten kann, wenn man es für kurze Zeiten auf hohe Temperaturen bringt. Das Lichtbogenverfahren verwirklicht diese Arbeitsbedingungen, indem es den Kohlenwasserstoffstrom durch eine elektrische Entladung jert. Da der Energieverbrauch bei der Acetylenherzeugung sehr stark ins Gewicht fällt, bemühte man sich schon lange, von der teuren elektrischen Energie abzukommen und die Reaktion so vorzunehmen, daß man einen Teil des Methans unter Wärmeerzeugung verbrennt und mit dieser Wärme den Rest des Methans zu Acetylen umsetzt. Folgende Gleichungen beschreiben etwa diese Reaktion:



Man ist nun so verfahren, daß man in den Methanstrom in Form einer umgekehrten Flamme Sauerstoff eingebracht hat und das gesamte Methan durch die kranz- oder fächerförmig angeordneten Sauerstoffflammen durchgeführt hat. Leider bekommt jedoch bei allen derartigen Arbeitsweisen, auf die es auch eine ganze Reihe von Patenten gibt, nur sehr schlechte Ausbeuten. Es kommt bei der Acetylenbildung nämlich darauf an, die günstigsten Reaktionsbedingungen sehr exakt einzuhalten. Die Zeiten liegen bei der Größenordnung von $\frac{1}{100}$ sec und die Temperatur bei 1400°C bis 1600°C. Bei tiefen Temperaturen entsteht kein Acetylen, und bei höheren zerfällt dieses kurzlebige Zwischenprodukt äußerst schnell in Wasserstoff und Ruß. Der Fehler der genannten Anordnungen besteht nun darin, daß das Temperaturfeld zu inhomogen ist, gewisse Bezirke des Methanstromes werden überhitzt und andere nicht heiß genug. Es ist das alte Problem jeder Feuerungstechnik, daß die Gasmischung zu langsam und die chemische Reaktion zu schnell vonstatten geht. Hier half nur ein radikaler Schritt: Er bestand darin, daß man diese beiden Prozesse trennte, d. h. die Gase werden zunächst gründlich und vollständig gemischt und erst, wenn die Mischung vollzogen ist, der chemischen Reaktion unterworfen. Bild 3 zeigt Ihnen unsere Acetylenbrenner. Methan und Sauerstoff werden getrennt vorgewärmt bis zur Zündtemperatur, die fallweise zwischen 400°C und 600°C liegt, und in den Mischaum geleitet. Hier vollzieht sich die Durchmischung, und man erhält ein Gemisch von z. B. 63% Methan und 37% Sauerstoff und 500°C, das an sich reaktionsfähig ist (es liegt innerhalb der Entzündungsgrenzen), das jedoch im Mischaum nicht reagiert, weil die Verweilzeit in demselben kurz ist und der Anlaß zur Entflammung fehlt. Dieses Gasgemisch strömt durch Steinkanäle in die eigentliche Brennkammer b und brennt hier, nachdem es einmal entzündet ist, stationär ab. Das Gemisch besitzt entsprechend seiner Zusammensetzung und seiner Temperatur eine bestimmte Flammgeschwindigkeit, mit der sich die Verbrennung dem Gasstrom entgegen fortpflanzt. Die Dimensionierung des Ofens ist so gewählt, daß in den Zuführungskanälen die Gasgeschwindigkeit größer als die Flammgeschwindigkeit ist und in der Brennkammer selber die Gasgeschwindigkeit kleiner als die Flammgeschwindigkeit ist. An der Stelle, wo das Gas aus den Zuleitungskanälen austritt, brennt daher die Flamme, sie schreitet ständig dem Gas

strom entgegen fort, kann jedoch in die Zuleitungskanäle selber nicht eindringen, da hier die Gasgeschwindigkeit zu groß ist. Beim Austritt aus der Brennkammer wird das Gas durch Einspritzen von Wasser nach der Brennkammer abgeschreckt. Durch entsprechende Auslegung und Belastung des Brenners ist es auf diese Weise möglich, sehr genaue Reaktionsbedingungen einzustellen, und die Acetylenausbeute aus Methan ist nahezu quantitativ. Der Anteil des Methans, der sich nach Reaktion 2 in Kohlenoxyd und Wasserstoff umsetzt, ergibt sich aus der Wärmebilanz des Verfahrens, er beträgt ungefähr $\frac{2}{3}$ des Gesamtmethans. Das Verfahren ist daher als eine kombinierte Arbeitsweise zur gleichzeitigen Gewinnung von Acetylen- und Synthesegas anzusehen. Da die Gewinnung von Synthesegas allein aus Methan schon eine recht rentable Arbeitsweise ist, kann man daher mit diesem Verfahren an den Stellen, wo Bedarf an Synthesegas vorhanden ist, Acetylen sehr rentabel gewinnen. Das Verfahren ist in Oppau technisch durchgeführt — ein Brenner verarbeitet $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ — und ist in Heydebreck in größerem Umfange im Bau.

B. Allgemeine Untersuchungen über Flammengeschwindigkeiten

Aus dem Vorstehenden, hat sich schon klar ergeben, daß bei den meisten technischen Verbrennungen der Vorgang der Gasmischung und der der eigentlichen Oxydation in zunächst recht unübersichtlicher Weise zusammenwirken. Ja, von einer definierten Flammengeschwindigkeit kann man eigentlich nur dort reden, wo es sich um die Fortpflanzung der Verbrennung in einem gleichmäßigen Brennstoff-Luftgemisch handelt. Diese Verhältnisse muß man untersuchen, wenn man den Chemismus der Flammenfortpflanzung kennen lernen will, und ich will Ihnen daher im folgenden unsere diesbezüglichen Beobachtungen mitteilen. Anschließend werden die dabei gewonnenen Ergebnisse auf die komplizierteren Fälle übertragen, bei denen in der Flamme der Mischvorgang und die Verbrennung selber zusammenwirken.

1. Die Flammengeschwindigkeit in Gemischen

Die Flammengeschwindigkeit in Gemischen läßt sich experimentell recht einfach bestimmen durch Ausmessen der Höhe des Kegels einer Bunsenflamme mit einem Kathometer. Diese Methode hat Haber vor ungefähr 40 Jahren am Gasinstitut in Karlsruhe angewendet, und seither ist dort eine große Tradition auf dem Gebiete entwickelt worden. Bild 4 zeigt Ihnen die Anordnung und die formelmäßigen Zusammenhänge. Die Methode ist vielfach geprüft und kritisiert worden. Zusammenfassend kann man nur sagen, daß sie überraschend genaue und gute Resultate liefert. Die einfachste Prüfungsmethode besteht darin, daß man die Flammengeschwindigkeit in einem bestimmten Brennstoff-Luftgemisch bei verschiedenen Durchsätzen oder mit verschiedenen Brennerrohren bestimmt. Auch bei merklich geänderten Versuchsbedingungen bekommt man auf diese Weise Werte, die im Rahmen von 5% des Absolutwertes übereinstimmen. Bild 5 zeigt Ihnen die praktische Ausführung der Arbeitsweise bei der Untersuchung von Kraftstoffen, die bei Zimmertemperatur flüssig sind. Es müssen hier sehr geringe Kraftstoffmengen (bis zu $2 \text{ cm}^3/\text{h}$) absolut gleichmäßig in einem Luftstrom verdampft werden. Wir haben zu diesem Zwecke den Kraftstoff aus der Bürette a in den mit Filtrierpapier angefüllten Verdampfer b hinübergedrückt. Zum Zwecke der Dosierung ließen wir Quecksilber durch eine äußerst feine Kapillare in die Bürette a einströmen, die Quecksilbermenge wurde durch die Höhe des Niveaugefäßes über der Kapillaren eingestellt.

Bevor ich die Meßresultate wiedergebe, will ich erläutern, wie man sich die Ausbreitung der Verbrennung in einem Brennstoff-Luft-Gemisch vorzustellen hat. Bild 6 bringt eine schematische Darstellung des Temperaturanstieges, den das Gas beim Verbrennungsvorgang erfährt. Man kann diese Temperaturanstiegskurve in zwei Teile zerlegen, einen unteren Bereich, in dem das Gas Wärme durch Leitung aufnimmt, bis die Temperatur erreicht ist, wo die Wärmeentwicklung durch die chemische Reaktion sich bemerkbar macht, und einen oberen Bereich, wo das Gas gleichzeitig Wärme infolge Wärmeleitung verliert. Zwischen beiden Bereichen gibt es einen Wendepunkt, den wir Zündpunkt nennen wollen. Die sekundlich auf das Frischgas übertragene Wärme wird durch Gleichung 1) wiedergegeben. Sie fließt infolge des Temperaturgefälles in der Flammenfront dem Frischgas entgegen, Gleichung 2). In grober Annäherung kann man dieses Temperaturgefälle linear ansetzen. Man nimmt weiterhin an, daß es einem Faktor k proportional ist, der die Reaktionsgeschwindigkeit enthält, und schließlich der Temperaturdifferenz $T_0 - T_2$. Auf diese Weise erhält man dann für die Flammengeschwindigkeit die Formel 3). Diese Ableitung stammt von Nusselt. Sie gibt ein sehr anschauliches Bild über den Zusammenhang der Größen, die an der Flammengeschwindigkeit beteiligt sind, leider ist sie aber nicht ganz richtig. Zunächst wird die Energie auf das ankommende Frischgas

4
 keineswegs nur durch Wärmeleitung übertragen, sondern auch durch Diffusion von hochaktiven Teilchen/Radikalen, die für die Entzündung eine sehr erhebliche Rolle spielen können, und zweitens ist der Begriff des Zündpunktes ungenau. Die chemische Reaktion setzt ganz kontinuierlich auch schon unterhalb des Zündpunktes ein, und ein scharfer Punkt ist auf diese Weise überhaupt nicht zu definieren. Leider sind jedoch die Zusammenhänge bezüglich der Flammengeschwindigkeit, wenn man sie genauer erfassen will, so kompliziert, daß es, wie ich glaube, bis heute immer noch keine bessere Formel gibt als die von Nusselt, und wir wollen sie daher weiter als Anhaltspunkt verwenden.

Von welchen Faktoren kann nun die Flammengeschwindigkeit in erster Linie abhängen?

- von der Reaktionsgeschwindigkeit der Verbrennung,
- von der Energieübertragung auf das Frischgas, und
- von der Endtemperatur der Flamme T.

Den Einfluß der Reaktionsgeschwindigkeit kann man erkennen, wenn man die Flammengeschwindigkeit von Stoffen vergleicht, bei denen der Verbrennungsablauf chemisch verschieden ist. Tabelle 2 bringt Ihnen die

| | OZ | Flammgeschwindigkeit (cm/sec) |
|---------------------|-----|-------------------------------|
| n-Heptan | 0 | 36,5 |
| IG 11 | 45 | 35 |
| VT 702 | 70 | 35 |
| C 3 | 94 | 34,5 |
| ET 110 | 100 | 31,5 |
| Triptan | 120 | 33,3 |
| Benzol | — | 44 |
| Diäthyläther | — | 36 |
| Schwefelkohlenstoff | — | 49 |

Tabelle 2. Flammgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Oktanzahl

Flammgeschwindigkeiten von Kraftstoffen verschiedener Oktanzahlen — es handelt sich immer um die maximalen Flammgeschwindigkeiten bei günstigstem Kraftstoff-Luft-Verhältnis — und man erkennt, daß die Oktanzahl völlig ohne Einfluß auf die Verbrennungsgeschwindigkeit ist. Tabelle 3 bringt zwei Kraftstoffe mit verschiedenen Mengen

| | Flammgeschwindigkeit (cm/sec) |
|-------------------------|-------------------------------|
| ET 110 | 31,5 |
| ET 110 + 0,36% Pb-Athyl | 32,8 |
| VT 702 | 35 |
| VT 702 + 0,12% Pb-Athyl | 34 |
| VT 702 + 0,36% Pb-Athyl | 35,5 |
| VT 702 + 5% Athylnitrat | 34,5 |

Tabelle 3. Einfluß von Klopf- und Antiklopfmitteln

von klopfördernden und klopfhindernden Zusätzen, auch hier ist kein Einfluß zu erkennen. Dieser Befund überrascht zunächst. Wenn auch die Theorie der Klopf- und Antiklopfmittel keineswegs klar ist, soviel ist doch ganz sicher: diese Zusätze haben einen entscheidenden Einfluß auf das Anspringen (das ist die Induktionszeit) und auf den Ablauf der Verbrennung. Man kann daher hier nur feststellen: die Geschwindigkeit, mit der sich die Verbrennung fortplant, hängt nicht merklich davon ab, wie die Moleküle im einzelnen bei der Verbrennung miteinander reagieren. Diese Schlußfolgerung kann man noch weiter bestätigen. Die chemische Reaktionsgeschwindigkeit ist äußerst empfindlich gegen Änderungen der Temperatur. Sie verdoppelt nach einer Faustformel ihren Wert bei einer Erwärmung um 10°C. Wenn sie von ausschlaggebendem Einfluß auf die Flammgeschwindigkeit ist, so muß auch diese mit der Temperatur stark ansteigen. Man kann das untersuchen, indem man Flammgeschwindigkeiten bei höherer Temperatur, das heißt mit vorgewärmtem Gas, untersucht. Tabelle 4 bringt für eine Reihe von

| | $\frac{W_f 100^\circ}{W_f 20^\circ}$ |
|---------------------|--------------------------------------|
| Benzol | 1,28 |
| C ₈ | 1,32 |
| Triptan | 1,33 |
| n-Heptan | 1,33 |
| Schwefelkohlenstoff | 1,46 |

Tabelle 4. Temperaturabhängigkeit der Flammgeschwindigkeit

Stoffen das Verhältnis der (gemessenen) Flammgeschwindigkeiten bei 20°C und bei 100°C. Ein Anstieg ist in der Tat vorhanden, aber er beträgt einer Erwärmung von 80°C

gerade 30 %, das ist lächerlich wenig im Vergleich zu dem, was man auf Grund der Reaktionsgeschwindigkeit erwarten würde. Bild 7 und Bild 8 zeigen die Temperaturabhängigkeit der Flammgeschwindigkeit an Propan-Sauerstoff- und an Methan-Sauerstoff-Gemischen, die ich vor einigen Jahren bestimmt habe. Selbst also, wenn man Methan-Sauerstoff auf 1000°C vorwärmt, erhält man nur einen Anstieg der Flammgeschwindigkeit um das dreifache! Also auch wenn man die Reaktionsgeschwindigkeit beliebig steigert, läßt sich die Flammgeschwindigkeit nicht aus der Ruhe bringen. Auch praktisch ist es von großem Interesse, zu wissen, wie wenig auch eine intensive Vorwärmung der Gase die Durchsatzgeschwindigkeit in der Flamme erhöhen kann. Die Reaktionsgeschwindigkeit kann praktisch so groß sein, wie sie will, der hemmende, die Geschwindigkeit bestimmende Schritt liegt woanders. Dieser Hemmschuh besteht offenbar darin, daß auch bei unendlich großer Reaktionsgeschwindigkeit die Energie nicht beliebig schnell auf das Frischgas übertragen werden kann.

Wir kommen damit zum zweiten Punkte, dem der Energieübertragung. Hier sind die Verhältnisse so kompliziert, daß man zahlenmäßig nichts Exaktes sagen kann. Die Wärmeleitfähigkeit bei den hohen wechselnden Temperaturen in Gasgemischen ist nicht bekannt. Der Einfluß der Energieübertragung durch Diffusion ist noch schwerer zu erfassen. Formal kann man für den Energietransport durch Diffusion eine ganz analoge Gleichung anschreiben, wie für den Energietransport durch Wärmeleitung, nur ist auch die Diffusionskonstante unter den Bedingungen der Flamme nicht bekannt. Insbesondere der Einfluß der Diffusion besonders energiereicher Teilchen ist garnicht zu erfassen, da man weder die Menge dieser Teilchen noch ihren Einfluß auf den Zündvorgang hemmt. Insgesamt läuft es darauf hinaus, daß man in der Gleichung von Nusselt mit höheren Zahlenwerte zu rechnen hat, als sie für die Wärmeleitung oder Diffusionskonstante im Landolt-Börnstein stehen. Daß die Diffusion eine wesentliche Rolle spielt, erkennt man vor allem daran, daß die Flammgeschwindigkeit bei Wasserstoff eine Größenordnung höher ist als bei allen anderen Stoffen und daß auch bei Gasgemischungen der Anteil des Wasserstoffs deutlich erkennbar ist. Im ganzen werden die Wärmeleitfähigkeit und die Diffusionskonstante für die Absolutwerte der Flammgeschwindigkeit von wesentlichem Einfluß sein, jedoch hängen diese Konstanten nicht sehr einschneidend von der Natur der Brennstoffe (mit Ausnahme des Wasserstoffs) ab und werden auch sonst durch die äußeren Bedingungen, wie Temperatur und Druck, nicht sehr stark beeinflusst. Die Temperaturabhängigkeiten von 30 % bei 100°C ΔT , wie man sie experimentell bei Flammen findet sind gerade von der Art, wie Diffusion und Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur abhängen. Diese Gesetzmäßigkeiten drücken der Flammgeschwindigkeit den Stempel auf, da der Energietransport auf das Frischgas der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist: wie man sagt, es ist der Engpaß, so wie z. B. die Geschwindigkeit, mit der eine große Zahl von Menschen aus einem Gebäude herauskamen, allein davon abhängt, wie weit die Haustür offen ist.

Die rohe Kenntnis des Energieübertragungsvorganges erlaubt uns immerhin eine ungefähre Abschätzung der Dicke der Flammenhaut. In Tabelle 2 brauchen wir lediglich irgend einen mittleren Wert für die Wärmeleitfähigkeit einzusetzen, und wir können uns Δx ausrechnen. Man bekommt auf diese Weise von 0,2 bis 0,3 mm für die bekommt auf diese Weise Werte von 0,2 bis 0,3 mm für die Dicke der Flammenhaut.

Wir kommen nun zu dem letzten Faktor, der auf die Flammgeschwindigkeit von besonderem Einfluß ist: es ist dies die Flammentemperatur. Daß die Flammentemperatur sehr wichtig ist, erkennt man bei jeder Messung einer Flammgeschwindigkeit schon daraus, daß die Flammgeschwindigkeit in der Nähe des stochiometrischen Luftverhältnisses, bei der das Temperaturmaximum liegt, ebenfalls ein ausgesprochenes Maximum hat, Bild 9. Dieses Geschwindigkeitsmaximum liegt jedoch bei sämtlichen Messungen nicht genau an der Stelle maximaler Flammentemperatur, sondern es ist ein bißchen nach der Seite des Brennstoffüberschusses verschoben, eine Tatsache, die wieder den Einfluß der Diffusion erkennen läßt. Zum näheren Studium des Temperatureinflusses haben wir die Temperaturen der verschiedenartigsten Flammen mit den betreffenden Geschwindigkeiten verglichen, Bild 10. Kurve I zeigt Wasserstoffflammen mit Luft-Sauerstoff-Gemischen mit ansteigendem Sauerstoffgehalt. Die Messungen der Flammgeschwindigkeiten habe ich der Literatur entnommen, und zu der Dissertation von Jahn, Karlsruhe, 1934, die zugehörigen Temperaturen habe ich selbst berechnet. Die Punkte 1 bis 9 geben die Daten für verschiedene Kohlenwasserstoffflammen. Bei 1 liegen Oktan und sämtliche anderen flüssigen Kraftstoffe paraffinischer Natur. Ungesättigte Kohlenwasserstoffe, wie C_2H_4 , C_3H_2 oder Benzol geben höhere Flammentemperaturen und auch höhere Flammgeschwindigkeiten. Um noch weitere Flammen verschiedener Temperatur vergleichen zu können, wurde Ottan mit verschiedenen Sauerstoff-Stickstoff-Gemischen verbrannt. Die Werte streuen etwas, aber die

selben Eigentümlichkeiten der einzelnen Flammen sind zu erkennen: im ganzen übersteigt die Flammgeschwindigkeit ziemlich eindeutig mit der Flammentemperatur. Scharf ins Gewicht fällt allein der Unterschied von der Knallgasflamme, die durch die extreme Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserstoffs gekennzeichnet ist. Man erkennt weiter, daß unterhalb einer gewissen Temperaturgrenze, die bei 1000 bis 1300°C liegt, die Flammgeschwindigkeit Null wird, das heißt, Gemische, die sich nicht über 1000 bis 1300°C erwärmen, sind nicht mehr in Form einer Flamme brennfähig. Ähnliche Werte kann man übrigens erhalten, wenn man die Wärmeentwicklung an den Zündgrenzen berechnet. Andererseits lassen sich nach dieser Faustregel Zündgrenzen aus der Wärmetönung berechnen.

Was bedeutet es nun, daß die Flammgeschwindigkeit so stark von der Flammenendtemperatur abhängt? Wir betrachten wieder unser Bild von der Flammenfortpflanzung (Bild 6). Da die Reaktionsgeschwindigkeit praktisch unendlich groß ist, springt die Temperatur, wenn einmal der Zündpunkt erreicht ist, in äußerst kurzer Zeit und steilem Anstieg auf die erreichbare Endtemperatur. Das mittlere Temperaturgefälle ist daher um so steiler, je höher die Endtemperatur ist.

Fassen wir noch einmal das über die Flammgeschwindigkeit Gesagte zusammen: es handelt sich um einen sehr komplizierten Effekt, an dem die verschiedenartigsten physikalischen und chemischen Einflüsse Anteil haben. Wenn man jedoch von Einzelheiten absieht und nicht zu übertriebene Ansprüche an die Genauigkeit stellt, bleiben zwei höchst einfache Regeln übrig: 1. der reine Wasserstoff brennt fünfmal so schnell wie alles andere, 2. die Flammgeschwindigkeit hängt im wesentlichen von der Flammentemperatur ab, sie ist bei Flammentemperaturen von 1200°C Null, steigt mit der Temperatur und beträgt mit Ausnahme der Wasserstoffflamme bei 2500°C 1 bis 1,5 m/sec.

2. Flammen nicht vorgemischter Gase

Der einfachste Fall, bei dem Gasmischung und Verbrennung zusammenwirken, liegt dann vor, wenn ein Gasstrahl aus einem Rohr in die umgebende ruhende Luft austritt und an der Austrittsstelle abbrennt. Man beobachtet, daß oberhalb einer bestimmten Austrittsgeschwindigkeit die Flamme sich vom Brenner abhebt und in einiger Entfernung vom Brenner weiterbrennt. Bei noch höheren Austrittsgeschwindigkeiten reißt sie dann ganz ab. Die Gasgeschwindigkeit, bei der das Abheben beginnt, wollen wir als Löschgeschwindigkeit bezeichnen. Bild 11 zeigt, wie die Löschgeschwindigkeit bei verschiedenen Gasen vom Rohrdurchmesser abhängt. Man erkennt, daß oberhalb eines bestimmten Durchmessers die Löschgeschwindigkeit konstant ist; es handelt sich hier offenbar allein um eine Brenneigenschaft des Gases, und Einflüsse der Anordnung sind ausgeschaltet. Bei kleinen Rohrdurchmessern haftet die Flamme wesentlich besser am Rohr. Die Krümmung des Rohres und damit der Flammenhaut ist hier so stark, daß die Wärme besser zusammengehalten wird und leichter auf das ankommende Frischgas übertragen wird. Die Dicke der Verbrennungszone berechneten wir auf 0,3 mm, und man sieht, daß die Beeinflussung durch den Krümmungsradius bis zum fünf- bis zehnfachen dieses Betrages stattfindet. Bei größeren Durchmessern ist das Strömungsproblem praktisch eben, daher im weiteren die Unabhängigkeit vom Durchmesser, die wir an den großen Brennern unserer Synthesegasspaltöfen bis zu Rohrdurchmessern von 250 mm bestätigen konnten. Bild 12 und Bild 13 bringen den Abstand der Flamme vom Brennerrohr als Funktion der Gasaustrittsgeschwindigkeit. Die Versuche sind mit Glasrohren von 3 bis 8 mm Durchmesser angestellt. Die Flamme haftet bis zu einer Grenzgeschwindigkeit fest, dann hebt sie sich ab, und der Abstand wächst ziemlich genau proportional mit der Austrittsgeschwindigkeit des Gases. Ein sauberes kontinuierliches Abheben beobachtet man vor allem, wenn man Brenner mit einem scharfen Rand hat, andernfalls bewirken die Ablösungswirbel an der Stirnfläche des Brenners, daß die Flamme etwas länger haftet und sich dann mit einem Ruck sofort auf einen größeren Abstand entfernt. Zum Studium dieses Einflusses wurden Versuche mit verschieden gestalteten Düsen angestellt. Das nächste Bild gibt darüber Auskunft, Bild 14.

In welcher Beziehung stehen nun die Löschgeschwindigkeiten zu den eigentlichen Flammgeschwindigkeiten in Gemischen? Die hydrodynamischen Verhältnisse beim Austritt eines Strahles aus einer Düse in ruhende Luft sind durch die Arbeiten von Prandtl¹⁾, Tollmien²⁾ und Zimm³⁾ relativ gut untersucht und geklärt. Bild 15 zeigt schematisch, wie man sich die Durchmischung vorzustellen hat. Das wesentliche Resultat der Prandtschen Theorie besteht darin, daß das Konzentrationsfeld bzw. der Öffnungswinkel des Strahles von etwa 23° weitgehend unabhängig von der Größe der Düse und von der Menge und der Geschwindigkeit des austretenden Gases ist. Der Impuls, der durch jeden Querschnitt des Strahles geht, ist kon-

stant, und die Konzentration des Kernstromes sinkt proportional mit dem Abstand von der Düse. Diese theoretischen Aussagen sind auch experimentell gut bestätigt⁴⁾. Das Geschwindigkeitsfeld ist dem hier im Bilde dargestellten Konzentrationsfeld analog. Man sieht, daß es eine konzentrisch um das Brennerrohr angeordnete Gasschicht gibt, in der die für die maximale Flammengeschwindigkeit erforderlichen Konzentrationen herrschen, und wenn die Austrittsgeschwindigkeit nicht zu groß ist, so bewegt sich diese Gasschicht mit einer Geschwindigkeit, die kleiner als die Flammengeschwindigkeit ist, vom Brennerrohr fort. Hier brennt also die Flamme. Steigert man die Austrittsgeschwindigkeit des Gases, so bleibt das Konzentrationsfeld erhalten, das Geschwindigkeitsfeld bleibt in seiner geometrischen Struktur ebenfalls unverändert, alle Absolutwerte aber steigen proportional der Gasaustrittsgeschwindigkeit. Jetzt kommt der Moment, wo die Gasgeschwindigkeit in der besagten Schicht größer wird als die durch die Konzentrationen bestimmte Flammengeschwindigkeit, und dann hebt sich die Flamme ab.

In Tabelle 5 gibt Ihnen die erste Zeile einen Überblick

| | CH ₄ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ |
|---|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Löschgeschwindigkeit in m/sec | 10 | 20 | 40 |
| % Gas in Luft bei maximaler Flammgeschwindigkeit (W _f) | 9,4 | 6,5 | 7,8 |
| Gasgeschwindigkeit an der Stelle von maximalem W _f beim Abreißen in cm/sec | 94 | 130 | 310 |
| Maximale Flammgeschwindigkeit in cm/sec | 38 | 70 | 145 |

Tabelle 5. Vergleich der Löschgeschwindigkeit mit der Flammgeschwindigkeit

über die Löschgeschwindigkeiten bei Methan, Äthylen und Acetylen. Wir fragen uns nun an welcher Stelle des Strahles bzw. des Konzentrationsfeldes ist die maximale Flammgeschwindigkeit vorhanden? Es sind das die Stellen, wo die Konzentrationen bestehen die nach der Bunsenmethode die Maximalwerte der Flammgeschwindigkeit ergeben haben. Die zweite Zeile gibt diese Werte an, die ja nach dem Luftbedarf der Gase etwas verschieden liegen. Wir fragen weiter, welche Gasgeschwindigkeit an dieser maximalen Flammgeschwindigkeit herrscht. Wir wollen dazu annehmen, daß die Geschwindigkeiten im Gasstrahl von der Mitte zum Rand nach der gleichen Gesetzmäßigkeit abnehmen wie die Konzentrationen. An einer Stelle, wo z. B. die Konzentration auf 9,4% gesunken ist, beträgt also auch die Gasgeschwindigkeit nur noch 9,4% des Maximalwertes von 10 m im Kern. Das heißt, es herrscht hier eine Gasgeschwindigkeit von 94 cm/sec. Diese so berechneten Geschwindigkeiten zeigt also die nächste Zeile. Darunter sind schließlich die maximalen Flammgeschwindigkeiten dieser Gase angegeben, wie sie aus der Literatur bekannt sind. Wenn man berücksichtigt, daß die gemachten Annahmen sehr roh sind und nur der qualitativen Verständnis, nicht aber der quantitativen Erfassung dienen können, so ist die Übereinstimmung überraschend gut. Tatsächlich steigt die Löschgeschwindigkeit genau in der gleichen Weise wie die Zündgeschwindigkeit. Die Absolutwerte unterscheiden sich alle in der gleichen Weise um den Faktor 2 von den berechneten, aber es spielen so viele Einzeleinflüsse, die man zahlenmäßig nicht erfassen kann, eine Rolle, daß diese Abweichung nicht überraschend ist. Daß es für das stationäre Brennen der Flamme lediglich darauf ankommt, daß an irgend einer Stelle die Gasgeschwindigkeit nicht größer als die Flammgeschwindigkeit ist, kann man noch durch folgenden Versuch sehr schön zeigen. Man hat eine Gasflamme brennen mit einer Austrittsgeschwindigkeit in der Nähe der Löschgeschwindigkeit. Mischt man jetzt dem Gas vor dem Brenner Luft zu, so ergibt sich der paradoxe Befund, daß die Flamme fortfliegt, obwohl die Mischung besser wird. Dadurch, daß der Kern schon Luft mitbringt, verschiebt sich die Stelle, an der die für die maximale Flammgeschwindigkeit erforderliche Luftkonzentration liegt, mehr in das Innere des Strahles, und hier sind die Gasgeschwindigkeiten eben wesentlich größer, so daß sich die Flamme abhebt. Auch hier kann man also sagen: nicht immer ist bei der besten Mischung auch die beste Flamme.

Betrachten wir nun weiter den Abstand, in dem sich die Flamme über dem Brenner bei Geschwindigkeiten oberhalb der Löschgeschwindigkeit hält.

Aus den Bildern 13, 14 und 15 hat sich ergeben, daß zunächst bei mäßigen Abständen ein ziemlich klarer proportionaler Anstieg des Abstandes mit der Geschwindigkeit vorhanden ist. Eine hydrodynamische Erklärung für diesen Befund haben wir bis jetzt noch nicht geben können. Experimentell hat er sich jedoch recht gut unter verschiedenartigen Verhältnissen bestätigt. Bei größeren Abständen werden die Verhältnisse unübersichtlicher. Die Flamme

17 dig

18 lit

brennt dann nicht mehr ruhig, sondern raucht und flackert. Immerhin ist man überrascht, daß man auch bei recht großen Abständen von der Düse noch eine recht stabile Verbrennung unterhalten kann. Als Beispiel mag Bild 16 dienen, wo bei der Austrittsgeschwindigkeit des Gases von 220 m/sec. der Abstand von der Düse 900 mm beträgt.

Betrachten wir noch einmal zusammenfassend das Ergebnis der letzten Versuche, so kommt man zu folgender Vorstellung. Jede Verbrennung spielt sich in der Form ab, daß eine Flammenhaut von etwa 0,3 mm Dicke mit der Geschwindigkeit von größenordnungsmäßig 50 cm/sec. durch das Gasgemisch wandert. Überall, wo die Mischung unter dieser Geschwindigkeit vorhanden ist, ist auch diese Flammenhaut da. Bei technischen Feuerungen, z. B. im Acetylenbrenner oder im Benzinmotor, sind im Mittel häufig andere Bedingungen realisiert, jedoch sind infolge der Inhomogenität der Bedingungen auch diese Verhältnisse stellenweise vorhanden. Die Räume sind daher mit einer sehr zerrfurchten und zerrissenen Flammenhaut erfüllt. Aus Bild Nr. 3 hatten wir gesehen, daß pro m^3 Flammenhaut 2 Millionen Wärmeinheiten pro Stunde frei werden. Der Acetylenbrenner oder der Benzinmotor mit einer Wärmeleistung von 60 Millionen Wärmeinheiten pro cbm enthält also in diesem cbm 30 qm Flammenhaut, das ist gerade soviel, als wenn man ein Taschentuch von 17 μm Kantenlänge in einem Raum von einem Liter unterbringt. So furchtbar eng zusammengedrückt ist das eigentlich garnicht, und man kann sich durchaus vorstellen, daß es durch besondere Maßnahmen möglich ist, noch mehr Flammenfläche im Feuerungsraum unterzubringen.

Ich bin am Ende meiner Ausführungen angelangt. Von einer vollständigen Theorie dieser sehr mannigfaltigen und ungemein faßelnden Erscheinungswelt sind wir noch weit entfernt. Ich hoffe jedoch, daß Ihnen mein Bericht einige Anregungen vermittelt hat und Ihnen einen Eindruck von der Bedeutung und dem Nutzen gegeben hat, den diese Probleme für die Durchführung unserer technischen Aufgaben hatten.

- 1) K. Rummel, Einfluß des Mischvorganges auf Verbrennungen von Gas und Luft in Feuerungen. Düsseldorf, Verlag Stahlisen 1937.
- 2) W. Jost, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Berlin, Springer 1939.
- 3) Prandtl.
- 4) Töllmien, Ztschr. f. angew. Math. u. Mechanik 6, 468, 1926, Wien-Harms.
- 5) Zimm, Forschungshefte aus dem Gebiet des Ingenieurwesens, Heft 234, 1921.
- 6) Zimm, siehe oben, sowie Sachse, Laborbericht 1484 vom 19. 4. 1937, Versuche über den Mischvorgang in strömenden Gasen.