

Über die Zündung strömender Propan-Luft-Gemische durch den elektrischen Funken.

Von
H. Lötsch.

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien.

Mit 4 Abbildungen.

(Eingelangt am 7. Mai 1951. Vorgelegt in der Sitzung am 10. Mai 1951.)

In einer in dieser Zeitschrift erschienenen Abhandlung hat *H. Mache* einfache Versuche beschrieben¹, in denen für Propan-Luft-Gemische untersucht wurde, wie die Zündfähigkeit eines Induktionsfunken vom Mischungsverhältnis und der Temperatur des Gemenges sowie von der Funkenenergie abhängt. Im besonderen ergab sich, daß die Stelle maximaler Zündbarkeit in unmittelbarer Nähe des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses gelegen ist (also sich weder beim Maximum der Verbrennungsgeschwindigkeit noch bei Sauerstoffüberschuß vorfindet) und daß durch eine Änderung in der Temperatur des Gemisches oder in der Energie des verwendeten Funken dieses Mischungsverhältnis maximaler Zündbarkeit nicht verschoben wird.

Bei diesen Versuchen strömte das Gemisch aus einem 1,6 m langen, 1 cm weiten Brennerrohr durch ein aufgesetztes, aus Supremaxglas gefertigtes Kreuzrohr von 2 cm Weite und 1 m Länge, in dessen nahe dem unteren Ende angesetzten seitlichen Armen die mikrometrisch verstellbaren Stahlelektroden (Spitzen von 70° Öffnungswinkel) eingekittet waren. So konnte ein Eindringen von Außenluft zur Zündstelle vermieden werden. Die Funkenstrecke lag nur 15 mm über der Mündung des Brennerrohres und wurde mittels einer Bosch-Zündspule TK 12/3 und zugehörigem Unterbrecher betrieben. Durch Füllen des Unterbrechers mit Leuchtgas läßt sich ein Oxydieren der Kontakte hinreichend verhindern.

In dem aus dem Brennerrohr aufsteigenden Strahl des Gasgemisches bildet sich über jedem Funken eine bläulichgrau leuchtende Spitze, die schnell wieder verschwindet — und zwar jenseits der beiden Zünd-

¹ Mh. Chem. 76, 287 (1946); vgl. auch Acta phys. Austr. 1, 74 (1946).

grenzen immer, innerhalb der Zündgrenzen aber nur dann, wenn die hier mögliche durchgreifende (explosive) Zündung wegen zu geringer Funkenenergie ausgeblieben ist. Tritt sie ein, so bildet sich über dem Funken ein helleuchtender Pfropfen brennenden Gases (in dem man Teile einer zerrissenen Brennfläche erkennen kann), der von der Strömungsgeschwindigkeit durch das Rohr nach oben getragen wird und erst über dem Rohrende verlöscht. Stellt man also die Zündvorrichtung so ein, daß nicht jeder Funke zündet, so kann man die je 100 Funken eingetretenen durchgreifenden Entzündungen zählen und in der Änderung dieser prozentualen „Entzündungszahl“ (z), wie sie mit der Veränderung der jeweils untersuchten Variablen eintritt, ein Maß für die hierdurch bewirkte Zu- oder Abnahme in der Zündbarkeit des Gemisches oder in der Zündfähigkeit des Funken erblicken.

So vorteilhaft auch dieses zeitsparende Verfahren im Hinblick auf die große Zahl der l. c. näher angeführten Variablen erscheinen muß, so kommt doch mit der Strömungsgeschwindigkeit des Gasgemenges ein weiteres neues Bestimmungsstück hinzu. Zwar kann man durch Beibehalten der Strömungsgeschwindigkeit während jeder eine andere Variable betreffenden Versuchsreihe diese Schwierigkeit vermeiden. Doch läßt sich schon wegen der Bedeutung, welche die Zündung wirbelnd strömender Gasgemische für alle Verbrennungsmotore besitzt, eine getrennte Untersuchung dieses Einflusses der Geschwindigkeit des strömenden Gemisches auf seine Zündbarkeit nicht umgehen. Es wurde daher mit der gleichen Methode und Apparatur eine Ergänzung der Arbeit von *Mache* in dieser Richtung durchgeführt und wird darüber im folgenden berichtet.

Das Propan-Luft-Gemisch strömte aus dem Brennerrohr mit Geschwindigkeiten von 10 bis 45 m/s. Die nötige Luftmenge förderte ein Rotationskompressor durch eine zweizöllige Rohrleitung in ein zylindrisches Gefäß von 30 l Inhalt, von wo sie in die am Fuß des Brennerrohres angebrachte Mischkammer gelangte. Ihre Messung erfolgte mittels einer Blende, die normgerecht hergestellt und zwischen genügend langen und geraden Ein- und Auslaufstücken in die Leitung eingebaut war. Das Gas, technisches Leuna-Propan, wurde aus der Stahlflasche über ein Reduzierventil, eine nasse Gasuhr und einen Regulierhahn zu dem anderen Anschluß der Mischkammer geleitet. Die verwendete Zündmaschine gab bei einer Funkenzahl von 50 je Min. mit 14 V Primärspannung und 6 mm Funkenlänge das Optimum an Zündwirkung. Die erzielten Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt. In ihr bedeutet die Abszisse (m-%) das Mischungsverhältnis, das heißt die Volumprocente des Propan in der gesamten Mischung und die Ordinate (z-%) den Mittelwert der Entzündungszahl je 100 Funken.

Bei der gewählten Funkenenergie und bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit (U) läßt sich dann jeweils ein unter und ein über dem stöchiometrischen Verhältnis von 4% liegendes Gemisch einstellen, bei dem von 100 Funken nur ganz wenige zu einer durchgreifenden

Zündung führen. Steigert man aber auf der linken Seite ($m < 4\%$) das Mischungsverhältnis oder setzt es auf der rechten Seite ($m > 4\%$) herab, so steigen die Entzündungszahlen rasch an und läßt sich folgendes feststellen:

1. Für eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit zeigt sich z dem m proportional, wird also der Zusammenhang zwischen Entzündungszahl und Mischungsverhältnis durch eine Gerade dargestellt. Diese Gerade ist bei Luftüberschuß nach rechts, bei Gasüberschuß nach links geneigt.

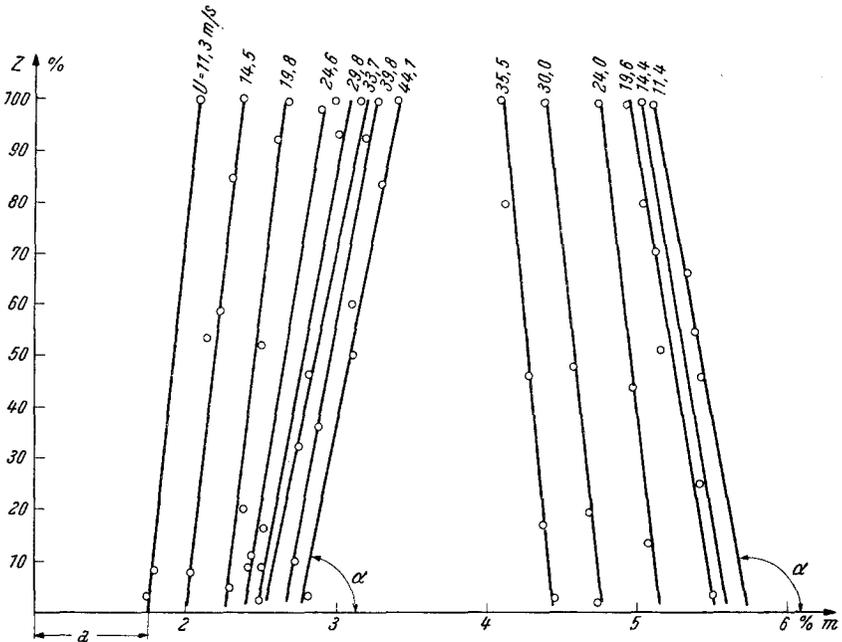


Abb. 1.

2. Bei schrittweiser Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit verschieben sich diese Geraden von beiden Seiten gegen die Mitte des Zündbereiches, das dadurch immer mehr eingeengt wird. Es gibt somit bei bestimmter Funkenenergie eine Strömungsgeschwindigkeit, bei der nur mehr das zündbarste Gemisch entflammt werden kann, und bei deren Überschreiten die gewählte Funkenenergie zur Zündung überhaupt nicht mehr ausreicht. Dieses zündbarste Gemisch liegt bei der stöchiometrischen Mischung. Wie von Funkenenergie, Funkenzahl und Temperatur (vgl. I. c.) hängt hiernach die Zusammensetzung des zündbarsten Gemisches auch von der Strömungsgeschwindigkeit nicht ab.

3. Die Geraden, auf denen die Entzündungszahlen liegen, lassen sich durch Gleichungen von der Form

$$m = a + b z$$

oder

$$z = \frac{1}{b} (m - a) = (m - a) \operatorname{ctg} \alpha$$

darstellen, worin a und b Funktionen der Geschwindigkeit U sind und α den Winkel bezeichnet, den die betreffende Gerade mit der positiven

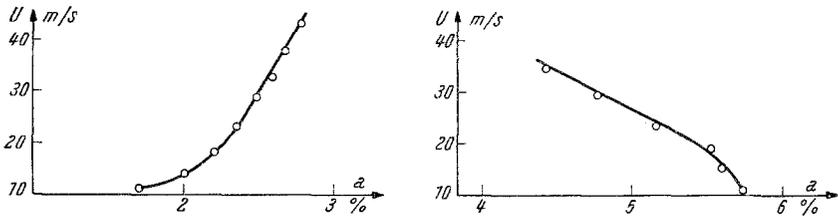


Abb. 2.

Richtung der Abszisse einschließt. Alle drei Größen können für jede Gerade aus Abb. 1 leicht ermittelt werden.

Es ist a der Abschnitt auf der m -Achse, also die Gemischzusammensetzung, welche der Entzündungszahl Null entspricht. Eine Zusammen-

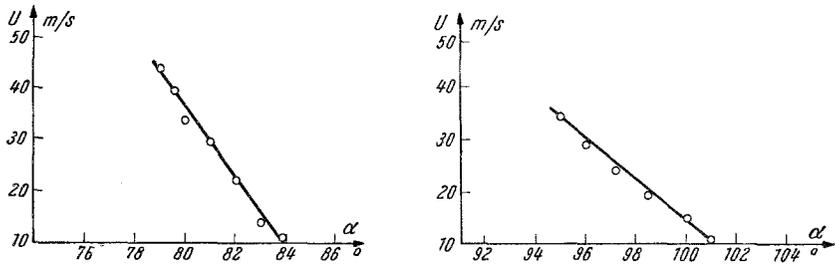


Abb. 3.

stellung dieser Werte (Abb. 2) läßt für beide Teile des Zündbereiches gleiches Verhalten erkennen. Für $U > 20$ m/s gilt lineare Abhängigkeit, für $U < 20$ m/s fällt a mit abnehmender Geschwindigkeit stärker ab, so daß beide Kurven sich innerhalb des untersuchten Geschwindigkeitsbereiches durch Parabeln annähern ließen.

Die Winkel $\alpha = \operatorname{arctg} b$ stehen nach der Zusammenstellung in Abb. 3 im gesamten Bereich mit der Strömungsgeschwindigkeit in einem linearen Verhältnis. Rücken die Geraden mit wachsender Geschwindigkeit gegen die Mitte, so wird α auf beiden Seiten kleiner. Auf der linken Seite neigen sich die Geraden stärker nach rechts, auf der rechten Seite richten sie sich auf. So bewirkt eine Änderung des Mischungsverhältnisses an der unteren Zündgrenze eine größere Änderung der Entzündungs-

zahlen als in der Mitte des Zündbereiches, während an der oberen Zündgrenze das umgekehrte Verhalten beobachtet wird.

4. Diese Feststellungen konnten auch für kleinere Funkenenergien gemacht werden. Es wurden die Primärspannung und alle anderen den Funken bestimmenden Größen beibehalten, die Funkenlänge aber von 6 auf 4 bzw. 2 mm reduziert und die Meßreihen wiederholt. Die Ergebnisse waren in allem Wesentlichen die gleichen.

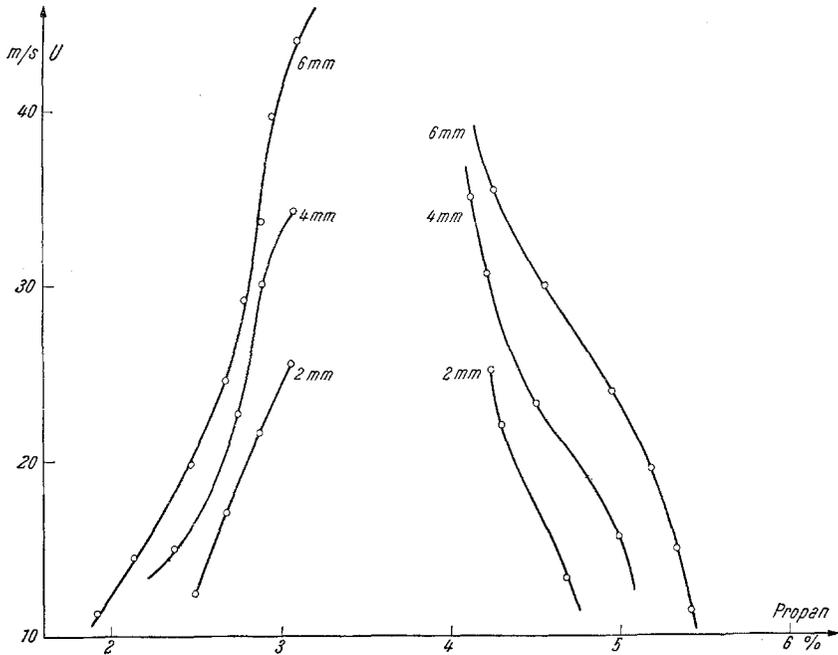


Abb. 4.

5. Leitet man aus den Geraden die Mischungsverhältnisse ab, bei welchen der Funke ebensooft zündet wie versagt ($\alpha = 50\%$) und trägt die Werte in ein Diagramm ein, das die Strömungsgeschwindigkeit als Ordinate und das Mischungsverhältnis als Abszisse enthält, so liegen diese Punkte gleicher „Zündwilligkeit“ beiderseits auf Kurven mit je einem Wendepunkt (Abb. 4). Man überblickt in dieser Darstellung besonders gut die Einengung des Zündbereiches mit wachsender Geschwindigkeit und seine Erweiterung mit wachsender Funkenenergie. Daß bei Mischungsverhältnissen zwischen 3,1 und 4,1 % keine Punkte eingetragen sind, hat darin seinen Grund, daß bei den hohen in diesem Bereich nötigen Strömungsgeschwindigkeiten die Entzündungszahl 50% selbst mit dem Funken von 6 mm Länge oft nicht mehr beobachtet werden kann. Zudem zeigen hier die Meßergebnisse Schwankungen um mehr als 10% und

sind die Explosionen oft so heftig, daß sie bis zur Zerstörung des Kreuzrohres führen können. Auch wechseln hier häufig ganze Reihen wirksamer Funken mit Reihen unwirksamer Funken ab, eine Erscheinung, die dahin zu verstehen ist, daß bei diesen hohen Geschwindigkeiten die Zündmaschine bis an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit beansprucht wird.

Zu einer Deutung vorstehender Ergebnisse wird man sich erinnern müssen, daß die Funkenentladung einer Induktionsspule aus einer „kapazitiven“ Hauptentladung und mehreren, allerdings weit schwächeren „induktiven“ Nachentladungen besteht. Nur die Dauer der oszillierenden hellweißen Hauptentladung ist sehr klein — etwa $1 \mu\text{s}$ —, so daß sich das Gemisch selbst bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 50 m/s währenddessen nur um $\frac{1}{20}$ mm verschiebt. Hingegen benötigen die ohne Polwechsel aufeinanderfolgenden, in Luft rötlichen Nachentladungen eine Gesamtzeit von etwa 1 m/s, während welcher sich das Gemisch bei der genannten Geschwindigkeit um volle 5 cm bewegt.

Nimmt man nun an, daß die von *Bonhoeffer* in der Glimmentladung festgestellte Zerlegung von Molekülen in reaktionsfähige Atome oder Atomgruppen in der Funkenentladung auch noch bei atmosphärischem Druck stattfindet und daß die Entzündung eintritt, sobald im brennbaren Gasgemisch an einer Stelle die Konzentration solcher, eine Reaktion auslösender Atome oder Atomgruppen einen bestimmten Wert erreicht hat, so bestehen zwei Möglichkeiten, um die Einengung des Zündbereiches, also die Zündverschlechterung, mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit in einfacher Weise zu erklären: Entweder man nimmt an, daß es die Hauptentladung ist, welche die aktivierten Teilchen schlagartig erzeugt und durch Diffusion unter der fördernden Einwirkung starker räumlicher Ladungen in hoher Konzentration aus der Funkenbahn in das Gemisch bringt. Trotzdem müßte die durchgreifende Entzündung nicht sofort erfolgen, falls Zündverzug eintritt. Es könnten die aktivierten Teilchen verwirbelt werden, ehe sie gezündet haben, so daß auf diese Weise die beobachtete Abhängigkeit der Entzündungszahlen von der Strömungsgeschwindigkeit zu verstehen wäre. Oder man nimmt an, daß nicht nur die Hauptentladung, sondern auch die Nachentladungen die Fähigkeit besitzen, aktivierte Teilchen in hinreichender Anzahl freizumachen. Es werden dann diese Teilchen mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit auf ein immer größeres Volumen verteilt werden und zu immer geringerer Konzentration gelangen. So bedarf es, um mit demselben Funken die gleiche Entzündungszahl zu erhalten, bei höherer Strömungsgeschwindigkeit eines gasreicheren Gemisches.

Es wird weiterer Versuche bedürfen, um zwischen diesen beiden Möglichkeiten, die vorliegenden Versuchsergebnisse zu erklären, eine Entscheidung zu treffen.