

Über das Mischungsverhältnis, bei dem ein Propan-Luftgemisch durch den elektrischen Funken am besten gezündet wird.

Von

H. Mache, w. M. d. österr. Akad. d. Wiss.

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Wien.

(Eingelangt am 21. Febr. 1946. Vorgelegt in der Sitzung am 21. Febr. 1946.)

Mit 5 Abbildungen.

An anderer Stelle¹ wurde bereits ein Verfahren beschrieben, das besonders geeignet erscheint, die Wirkung der sie beeinflussenden veränderlichen Größen auf die Zündfähigkeit einer elektrischen Zündvorrichtung oder Funkenstrecke und auf die Entzündbarkeit eines durch die Funkenstrecke strömenden brennbaren Gemisches näher zu untersuchen.

Diese Veränderlichen beziehen sich auf

a) die Zündvorrichtung, die durch ihre Selbstinduktion, Kapazität, Stärke und Spannung des Primärstromes sowie durch die Art und Zahl der Unterbrechungen beschrieben wird, oder ohne weitere, gesonderte Untersuchung des Einflusses dieser einzelnen Bestimmungsstücke, durch das Oszillogramm der Entladung.

b) die Funkenstrecke, die in ihrer Wirkung von der Form, Distanz und dem Metall der Elektroden abhängen kann — gegebenenfalls auch von äußeren Ionisatoren.

c) das zu zündende Gemisch, das hinsichtlich seiner Zündbarkeit von der chemischen Natur des Brennstoffes und dem Mischungsverhältnis der Bestandteile sowie von seinem physikalischen Zustand (Druck und Temperatur) abhängen wird.

d) die Energieverluste an die Umgebung.

e) die Geschwindigkeit, mit der das Gemisch durch die Funkenstrecke strömt.

¹ Österr. Ing.-Arch. 1, H. 4/5 (1946).

Man hat solche Untersuchungen bisher in der Weise durchgeführt, daß man ein Gefäß bestimmter Form und Größe, das die Funkenstrecke enthielt, mit dem Gemisch füllte und das Eintreten oder Ausbleiben der Entzündung feststellte, wenn man den Funken springen ließ. Demgegenüber bietet das hier verwendete Verfahren, bei dem das Gemisch strömt und sich hierdurch ständig von selbst erneuert, den Vorteil, die Zahl der Versuche bis zur Zahl der einzeln noch beobachtbaren Entladungen steigern zu können, was bei der Streuung der Ergebnisse für die Bildung verlässlicher Mittelwerte besonders erwünscht ist. Freilich kommt andererseits mit der Strömungsgeschwindigkeit des Gasgemisches ein neues

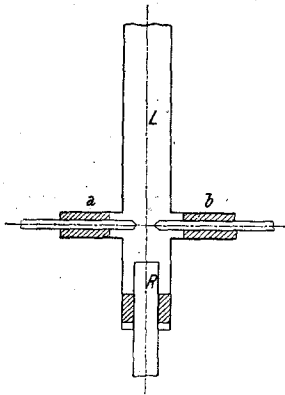


Abb. 1.

Bestimmungsstück hinzu, das die ohnedies vielen Variablen um eine weitere erhöht. Es wird der Einfluß einer jeden anderen Veränderlichen nur unter Beibehaltung der gewählten Strömungsgeschwindigkeit während der betreffenden Versuchsreihe zu erfassen sein. Wir kommen darauf noch zurück.

Auch das bei den Versuchen verwendete Gerät wurde i. c. schon kurz beschrieben. Durch das nebenan (Abb. 1) skizzierte, aus schwer schmelzbarem Glas gefertigte Kreuzrohr von 2 cm Durchmesser ließ man aus dem 1 cm weiten und 1,6 m langen Brennerrohr (*R*) aus gezogenem Messing das Gemisch durch die Funkenstrecke strömen, die aus zwei mikrometrisch verstellbaren Stahlelektroden bestand, die 3,5 mm dick

waren und in Spitzen von 70° Öffnungswinkel endigten. Diese Elektroden waren in den Armen *a* und *b* des Kreuzrohres axial eingekittet, so daß jedes Eindringen von Außenluft zur Zündstelle oder in das etwa 1 m lange Steigrohr *L* verhindert wurde. Die Mündung des Brennerrohrs lag in der Regel 15 mm unter der Funkenstrecke.

Eine schwache Lichterscheinung in Form einer bläulichgrau leuchtenden Spitze bildet sich dann im Gasstrom über dem Funken immer, selbst dann, wenn das Gemisch jenseits der Zündgrenzen liegt oder wenn innerhalb der Zündgrenzen die Funkenenergie zu einer wirklichen Entzündung nicht ausreicht. Die letztere ist nur dann eingetreten, wenn sich über dem Funken plötzlich ein hell leuchtender Pfropfen brennenden Gases bildet, der ohne zu erlöschen, von der Strömung nach oben getragen wird. In der Nähe der Zündgrenzen sind diese Entzündungen fast lautlos und nur im verdunkelten Raum zu zählen; in der Nähe des stöchiometrischen Gemisches erfolgen sie aber explosionsartig unter weithin hörbarem Geräusch. Stellt man die Zündvorrichtung so ein, daß nicht jeder Funken zündet, so kann man die je 100 Funken eintretenden

wahren Entzündungen zählen und in der Änderung dieser prozentuellen „Entzündungszahl“ (z), wie sie z. B. mit der Änderung des Mischungsverhältnisses (n) oder der Temperatur (t) oder der Strömungsgeschwindigkeit (U) eintritt, ein Maß für die hierdurch bewirkte Änderung der Zündbarkeit des Gemisches erblicken.

Natürlich muß die Strömungsgeschwindigkeit so hoch gewählt werden, daß auch bei den Gemischen höchster Verbrennungsgeschwindigkeit kein Zurückschlagen der Flamme und Bildung eines stationären Brennekegels auf dem Rohr R eintritt. Das war mit den verfügbaren Geschwindigkeiten bei Leuchtgas oder Methan nicht zu erreichen, hingegen bei Verwendung von Propan ohneweiters möglich. Die schweren Moleküle dieses Gases diffundieren so langsam, daß sich um den aus dem Rohr R austretenden Strahl keine Mischschicht bildet, die, langsamer strömend, die Entzündung bis herab auf das Brennerrohr gelangen läßt. Wir erwähnen noch, daß vorläufige Versuche mit einem 2,1%igen Propan-Luft-Gemisch bei Geschwindigkeiten von 120 bis 250 cm/s unter sonst ganz gleichbleibenden Verhältnissen ergeben haben, daß die Entzündungszahlen der Strömungsgeschwindigkeit etwa verkehrt proportional sind ($z \cdot U = \text{konst}$). Man wird daraus schließen dürfen, daß neben der hellweißen, außerordentlich kurz dauernden, kapazitiven Hauptentladung auch die um vieles länger dauernden induktiven Nachentladungen an der Zündung wesentlich beteiligt sind. Es ist nämlich nur dann ein Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Konzentration der aktivierten Moleküle zu verstehen, wenn sich während der gesamten Dauer der Entladungen, die in einem Funken statthaben, das Gemisch merklich aus der Funkenstrecke verschiebt.

Zur Herstellung bestimmter Mischungen standen zwei geeichte Kubizierapparate von 300 bzw. 200 l Fassungsraum zur Verfügung, die beide mit Auftriebskompensation versehen waren und mittels Diopter oder Lupe abgelesen wurden. Luft und Propan wurden in einer im unteren Ende des Brennerrohres eingeführten Glasbläserlampe gemischt. Einige darüber im Rohr angebrachte Drahtnetze sorgten für vollständige Mischung.

Die Funkenstrecke wurde mittels einer Bosch-Zündspule TK 12/3 mit zugehörigem Unterbrecher betrieben. Um die Oxydation der Kontakte zu verhindern, war der Unterbrecher stets mit Leuchtgas gefüllt.

Ein brennbares Gasgemisch kann nur zwischen den Zündgrenzen mit selbständiger Flamme gebrannt werden. Seine Zündbarkeit ändert sich hierbei vor allem mit dem Mischungsverhältnis und wird bei einem bestimmten Wert dieses Verhältnisses ein Maximum haben, über dessen Lage aber überraschenderweise keine systematischen Untersuchungen vorliegen, obwohl sie auch von praktischer Bedeutung wären. Hierbei wird man besonders die Funkenzündung im Auge haben, aber beachten

müssen, daß das Mischungsverhältnis bester Zündbarkeit auch von der Art der Zündung abhängig sein kann. Die folgenden Ergebnisse sind auf den Fall thermischer Zündung nicht zu übertragen.

Aber auch für die Funkenzündung läßt sich die Frage nach dem Mischungsverhältnis größter Entzündlichkeit nur durch den Versuch beantworten. Wohl mag es naheliegen, diese Stelle beim stöchiometrischen Mischungsverhältnis zu suchen. Andererseits zeigen alle brennbaren Gemische nicht dort, sondern erst bei Gasüberschuß das Maximum ihrer Verbrennungsgeschwindigkeit, was das gleiche für die Mischung bester Zündbarkeit erwarten ließe. Aber auch ein Gemisch mit Luftüberschuß könnte diese Eigenschaft maximaler Entzündlichkeit aufweisen. Hat man doch die Entzündung durch den elektrischen Funken oft als beschleunigte Oxydation aufgefaßt, so daß eine Verschiebung der Stelle bester Zündbarkeit auf die Seite des Luftüberschusses durchaus denkbar wäre. Eine Erhöhung der Zahl der zur Aktivierung verfügbaren Sauerstoffmoleküle könnte innerhalb gewisser Grenzen selbst bei Abnahme des zu oxydierenden Bestandteils eine Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit bewirken. Auch bei Zündung durch adiabatische Kompression liegt nach *Falk*² das Minimum der Entzündungstemperatur für Knallgas auf der Seite des Sauerstoffüberschusses, ja ist nach *Dixon* und *Crofts*³ noch nicht erreicht, wenn die Zahl der O_2 -Moleküle in der Mischung die der H_2 -Moleküle um das 15fache überschreitet.

So betraf die erste Untersuchung die Änderung der Entzündungszahlen mit der Zusammensetzung des Propan-Luft-Gemisches.

Das verwendete, zu einigen Prozent butanhältige „Leuna“-Propan war zwischen den Grenzen von 2 bis etwa 10,5% brennbar. Es wurde zunächst aus der stehenden Flasche, also gasförmig entnommen, was wegen der wesentlich geringeren Dampfspannung des Butans zur Folge hat, daß mit fortschreitender Entleerung der Flasche das ursprünglich fast rein ausströmende Propangas butanreicher wird. Erst später wurde die Flasche gekippt, also ihr Inhalt flüssig entnommen, so daß man immer mit demselben Stoff experimentierte. Das ist bei dem Vergleich der Meßreihen, die teils mit einer fast vollen, teils mit einer fast entleerten Flasche erhalten wurden, zu beachten.

Es wurden sowohl an den beiden Zündgrenzen wie in der Umgebung des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses Messungen durchgeführt. An den Zündgrenzen benützte man eine Funkenlänge von 6 mm, bei den explosiblen Mischungen eine solche von 0,5 mm. Die Primärspannung betrug in allen Fällen 12,5 V. Da das Mischungsverhältnis durch Änderung nur einer Komponente (Luft) eingestellt wurde, war in einer Meßreihe

² *H. G. Falk*, Ann. Physik (6), 24, 450 (1907).

³ *W. A. Bone* und *D. Townend*, Flame and Combustion in Gases, S. 74f. London, 1927.

die Strömungsgeschwindigkeit an jeder Stelle eine etwas andere, was nach dem oben Gesagten grundsätzlich eine Fehlerquelle beinhaltet, die aber angesichts der sonstigen Streuung der Ergebnisse nicht ins Gewicht fiel. Unter U findet sich der Mittelwert verzeichnet. Weiters gibt $n\%$ die Volumprocente des Propan in der gesamten Mischung und $z\%$ die mittlere Entzündungszahl je 100 Funken, gezählt über 200 bis 300 Funken.

Abhängigkeit der Entzündungszahlen vom Mischungsverhältnis.

Untere Zündgrenze $U = 330$ cm/s		Obere Zündgrenze $U = 110$ cm/s		Mittlerer Bereich $U = 170$ cm/s	
$n\%$	$z\%$	$n\%$	$z\%$	$n\%$	$z\%$
2,54	5,2	9,43	1,4	3,56	8,3
2,58	14,7	9,31	5,5	3,76	41,7
2,61	31,0	9,06	24,0	3,81	55,5
2,74	50,0	9,0	33,0	3,86	62,6
2,82	54,0	8,95	33,0	3,91	69,8
2,87	60,0	8,83	47,0	4,05	74,0
3,05	87,0	8,70	62,0	4,42	62,4
		8,45	67,0	4,84	47,0
				4,94	41,4

Diese Zahlenreihen und deren Darstellung in den Abb. 2, 3 und 4 lassen folgendes erkennen:

Es besteht innerhalb der verwendeten engen Bereiche eine lineare Abhängigkeit der Entzündungszahlen vom Mischungsverhältnis. An der unteren Zündgrenze bewirkt eine Erhöhung des Mischungsverhältnisses um $0,1\%$ eine Erhöhung der Entzündungszahl um 17% , an der oberen Zündgrenze eine Erniedrigung um 8% . Im mittleren Bereich sind die bezüglichen Werte 16% und 4% . Dort treffen sich die beiden Geraden, wie man der Abb. 4 entnimmt, in einem Punkt, der dem Mischungsverhältnis $3,95\%$ entspricht. Dort findet sich also das Maximum der Zündbarkeit. Das stöchiometrische Mischungsverhältnis für Propan und Luft liegt bei $4,03\%$, das Maximum der Verbrennungsgeschwindigkeit nach eigenen Versuchen⁴ hingegen bei $4,4\%$ und nach Versuchen von *Smith*⁵ bei 95% der theoretisch erforderlichen Luftmenge, also bei $4,24\%$. Neuerdings finden *Hahnemann* und *Ehret* hierfür wiederum $4,4\%$. Hiernach ist bei Funkenzündung das entzündlichste Gemisch von Propan und Luft mit dem stöchiometrischen identisch oder mindestens ihm sehr nahe gelegen.

⁴ *H. Mache* und *A. Hebra*, Wiener Ber. **150**, 157 (1941).

⁵ *F. A. Smith*, Chem. Review **21**, 389 (1937); auch *W. Jost*, Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, S. 72. Berlin, 1939.

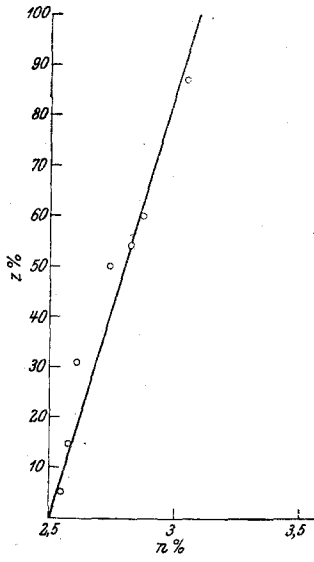


Abb. 2.

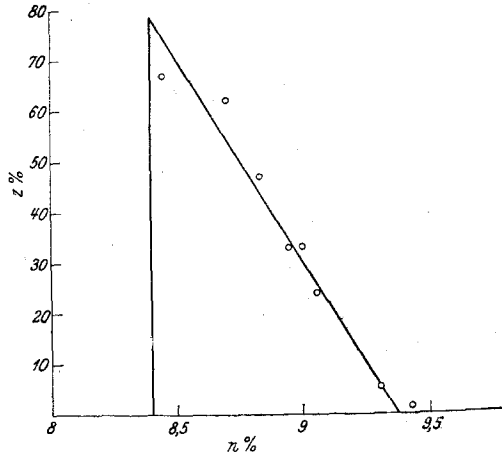


Abb. 3.

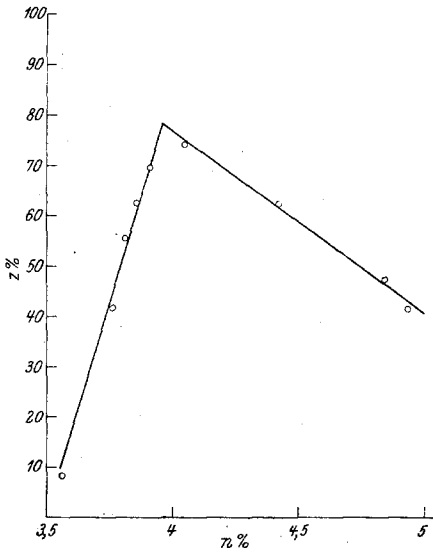


Abb. 4.

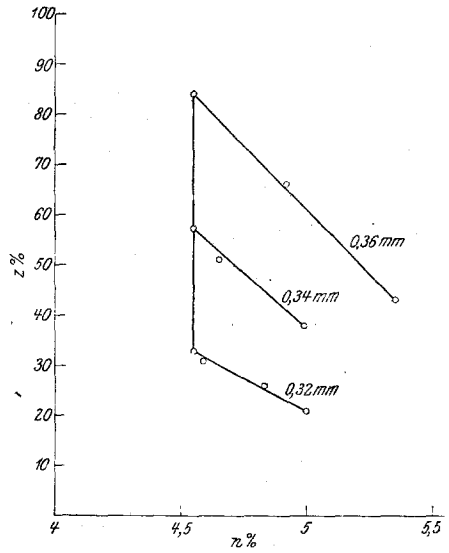


Abb. 5.

Die weitere Untersuchung betraf die Frage, ob das Mischungsverhältnis bei dem der Funken am besten zündet, durch Veränderung der Temperatur des Gemisches oder der Energie des Funkens verschoben werden kann.

Um den Einfluß der Temperatur zu untersuchen, wurde auf der unteren Hälfte des Brennerrohres zwischen zwei Asbestlagen eine Heizwicklung aus Cekas-Draht angebracht, die das durchströmende Gasgemisch auf eine Temperatur erwärmte, die nach etwa 40 Minuten konstant blieb und an einem im Steigrohr hängenden Thermometer abgelesen wurde. Es ergaben sich bei den gleichen Funkenlängen und der gleichen Primärspannung, wie sie bei den eben beschriebenen Versuchen verwendet worden waren, an den Zündgrenzen und im mittleren Bereich bei den angegebenen Temperaturen die folgenden Entzündungszahlen:

Abhängigkeit der Entzündungszahlen von der Temperatur.

Untere Zündgrenze $U = 480 \text{ cm/s}$			Obere Zündgrenze $U = 90 \text{ cm/s}$			Mittlerer Bereich $t = 53^\circ, U = 510 \text{ cm/s}$	
$t^\circ\text{C}$	$n\%$	$z\%$	$t^\circ\text{C}$	$n\%$	$z\%$	$n\%$	$z\%$
22	2,53	11	22	10,7	3	3,32	14
53	2,55	99	38	10,5	77	3,56	27
			50	10,6	99	3,66	36
						3,78	43
						4,04	58
						4,15	55
						4,40	47
						4,66	41
						5,04	25

Es genügt also schon eine Steigerung der Temperatur des Gemisches von Zimmertemperatur auf 50° , um zu erreichen, daß fast jeder Funken zündet; anders gesagt: eine relativ geringe Temperaturerhöhung läßt nach dem hier gegebenen Verfahren bereits eine Erweiterung der Zündgrenzen erkennen, wie sie über größere Temperaturbereiche von *White* und anderen Forschern schon seit langem festgestellt worden ist (vgl. *Bone* und *Townend*, l. c. S. 99). Vor allem aber zeigt sich im mittleren Bereich das Maximum der Zündbarkeit bei 53° innerhalb der Versuchsfehler an derselben Stelle gelegen, wie im früheren Versuche (Zahlenreihe 3), der bei 16° ausgeführt worden war. Hiernach hat also die Temperatur auf die Lage der Stelle bester Zündbarkeit keinen merklichen Einfluß.

Um einen eventuellen Einfluß der Energie des Funkens auf die Lage dieses Maximums festzustellen, wurden Induktoren verschiedener Kapazität und Selbstinduktion verwendet oder die Primärspannung verändert. Außer der Boschspule standen noch einige Induktoren mit den maximalen Schlagweiten von 3, 4 und 8 cm zur Verfügung (mit den Inv.-Nr. 295,

296 und 146 II bezeichnet), die aber alle mit dem gleichen Bosch-Unterbrecher betrieben wurden. An den Zündgrenzen ergaben sich für die verschiedenen Induktoren bei der gleichen Primärspannung von 12,4 V und bei einer Funkenlänge von 6 mm die folgenden Entzündungszahlen:

Abhängigkeit der Entzündungszahlen vom verwendeten Induktor.

Untere Zündgrenze $U = 225$ cm/s			Obere Zündgrenze $U = 90$ cm/s		
Induktor	n %	z %	Induktor	n %	z %
Bosch	2,54	7	Bosch	9,35	5
295	2,54	62	295	9,32	7
296	2,54	92	296	9,38	91
146 II	2,54	98	146 II	9,36	100

Die Erhöhung der Zündfähigkeit des Funkens mit wachsender Energie kommt hier deutlich zum Ausdruck. Hingegen ist das der maximalen Zündbarkeit entsprechende Mischungsverhältnis von der Funkenenergie unabhängig, wie die folgenden zwei Meßreihen beweisen, die im mittleren Bereich bei einer Elektrodendistanz von 0,5 mm und einer Spannung von 2,1 V mit den Induktoren von 4 bzw. 8 cm Schlagweite erhalten wurden:

Unabhängigkeit des Mischungsverhältnisses maximaler Zündbarkeit vom verwendeten Induktor.

Induktor 296 $U = 370$ cm/s		Induktor 146 II $U = 370$ cm/s	
n %	z %	n %	z %
3,80	21	3,84	42
3,87	26	3,97	59
3,98	32	4,05	66
4,20	22	4,08	64
4,22	20	4,25	55
4,40	15	4,60	46
		5,04	25

Wieder liegt das Maximum der Zündbarkeit, unabhängig vom Zündgerät, bei einem Mischungsverhältnis von fast genau 4%.

Aber auch eine Änderung der Primärspannung ist auf diese Lage ohne Einfluß, wie ein Vergleich der mit der Boschspule bei 12,5 V Spannung erhaltenen Zahlenreihe (3) des ersten Versuches mit der folgenden Tabelle erkennen läßt, die mit dem gleichen Gerät, aber bei nur 6,3 V Spannung gemessen wurde. Um überhaupt Zündung zu erreichen, mußte hierbei die Elektrodendistanz von 0,5 auf 0,6 mm erhöht werden.

Unabhängigkeit des Mischungsverhältnisses maximaler Zündbarkeit von der Primärspannung:

$$U = 470 \text{ cm/s}$$

$n\%$	3,60	3,77	3,96	3,99	4,09	4,55
$z\%$	14	33	55	58	56	38

Schließlich sollen noch zwei Beobachtungen Platz finden:

Die eine betrifft die Verschiebung des Mischungsverhältnisses maximaler Entzündlichkeit mit der Veränderung in der Zusammensetzung des verwendeten technischen Propan. Die bisher angeführten Versuche wurden teils mit voller, teils mit gekippter Flasche vorgenommen und ergaben in beiden Fällen gleiche Werte für die Lage dieses Maximums. Wurde hingegen das technische Propan aus einer Flasche entnommen, die stehend fast geleert worden war, und hatte so das in der Flasche vorhandene Gemisch durch fraktionierte Destillation einen höheren Gehalt an schwer siedenden Bestandteilen erhalten, so ergab sich eine Verschiebung in der Lage des Maximums von 4 auf etwa 4,4%, wie die folgende Tabelle erkennen läßt. Sie wurde mit der Boschspule bei 12,4 V Primärspannung und 0,5 mm Elektrodendistanz erhalten.

Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses maximaler Zündbarkeit vom Gehalt des Propan an schwer siedenden Bestandteilen:

$$U = 470 \text{ cm/s}$$

$n\%$	3,67	4,10	4,31	4,41	4,53	4,64	4,99
$z\%$	1	38	54	62	54	53	40

Eine zweite Beobachtung betrifft die Änderung des Zündvermögens einer bestimmten Zündvorrichtung mit der Elektrodendistanz. Hierbei zeigt sich an den Zündgrenzen ein wesentlich anderes Verhalten als im Bereich optimaler Zündbarkeit, wie die beiden folgenden Zahlenreihen erkennen lassen. Für die unter Δ verzeichneten Elektrodendistanzen wurden bei 12,5 V Primärspannung mit der Boschspule die unten gegebenen Entzündungszahlen gemessen.

Abhängigkeit der Entzündungszahlen von der Elektrodendistanz an den Zündgrenzen:

Untere Zündgrenze, $n = 2,1\%$.

Δ in mm ...	2	3	4	6	7
$z\%$	0,9	2,3	4,0	4,5	4,0

Obere Zündgrenze, $n = 8,7\%$.

Δ in mm ...	2,5	3	4	5	6	7	8	9
$z\%$	1,5	3,5	54	88	50	31	25	20

Das Zündvermögen des Funkens steigt also an beiden Grenzen mit der Länge des Funkens zu einem Höchstwert, der zwischen 5 und 6 mm erreicht wird. Die Abnahme bei längeren Funkenstrecken hat aber nicht etwa darin ihren Grund, daß bei den größeren Funkenlängen die Elek-

trodenenden schon in die Mischungsschichte zu liegen kommen, die den aus dem Brennerrohr aufsteigenden Strahl umgibt; denn verringert man die Höhe der Funkenstrecke über der Rohrmündung von 15 mm auf 8 mm, so hat dies auf das Ergebnis keinen Einfluß. Man wird vielmehr dieses Verhalten dahin deuten müssen, daß nicht nur die Energie, sondern auch die Struktur des Funkens seine Zündfähigkeit beeinflusst.

Ungleich stärker als an den Zündgrenzen zeigt sich aber der Einfluß der Funkenlänge in der Nähe des zündbarsten Gemisches, wie die folgende Tabelle lehrt, die mit Propan gewonnen wurde, das aus der fast leeren, stehenden Flasche entnommen war, so daß das Mischungsverhältnis maximaler Zündbarkeit bei 4,4% lag. Für jede der drei Elektrodendistanzen von 0,32, 0,34 und 0,36 mm wurde eine Meßreihe mit verändertem Gemisch durchgeführt, wobei man vom Wert 4,55% zur gasreicheren Seite ging. Aus diesen Zahlen und der graphischen Darstellung in Abb. 5 erkennt man die außerordentliche Steigerung der Entzündungszahlen bei einer Vergrößerung der Elektrodendistanz um auch nur 0,04 mm.

Abhängigkeit der Entzündungszahlen von der Elektrodendistanz in der Nähe des Mischungsverhältnisses maximaler Zündbarkeit:

Boschspule, $U = 470$ cm/s

= 0,32 mm		= 0,34 mm		= 0,36 mm	
n%	z%	n%	z%	n%	z%
4,55	33	4,55	57	4,55	84
4,59	31	4,65	51	4,92	66
4,83	26	4,99	38	5,35	43
5,0	21				

Zusammenfassung.

1. Bei den hier untersuchten Propan-Luft-Gemischen liegt die Stelle maximaler Zündbarkeit (durch den elektrischen Funken) in unmittelbarer Nähe des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses, also weder an der Stelle höchster Verbrennungsgeschwindigkeit noch im Gemisch mit Sauerstoffüberschuß.

2. Weder eine Änderung in der Temperatur des Gemisches noch in der Energie des zur Zündung verwendeten Funkens vermag dieses Mischungsverhältnis höchster Zündbarkeit zu beeinflussen.

3. Hingegen wird die Zündbarkeit des Gemisches im ganzen Bereich seiner Brennfähigkeit, einschließlich der Zündgrenzen, durch jede auch nur kleine Temperatursteigerung wesentlich verbessert. Desgleichen steigt das Zündvermögen des Funkens mit seiner Energie; an den Zündgrenzen um vieles weniger als im mittleren Gebiet, wo Veränderungen der Funkenlänge um wenige Hundertstel Millimeter die Entzündungszahlen beträchtlich erhöhen.