

# A N G E W A N D T E C H E M I E

Ausgabe B · 20. Jahrgang · Nr. 7 · Seite 169–196 · Juli 1948

## TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHER TEIL

CHEMISCHE TECHNIK · VERFAHRENSTECHNIK · APPARATEBAU

F o r t s e t z u n g d e r Z e i t s c h r i f t „D i e C h e m i s c h e T e c h n i k“

Organ der Gesellschaft Deutscher Chemiker in der britischen Zone und der Gesellschaft Deutscher Chemiker in Hessen

## Zündung explosibler Gas-Luft-Gemische durch Funken statischer Elektrizität<sup>1)</sup>

Von Dr. FRIEDRICH BROIHAN, Hannover

Unter verschiedenen Versuchsbedingungen wurden zahlreiche Zündversuche mit explosiblen Wasserstoff-, Schwefelkohlenstoffdampf- und Leuchtgas-Luft-Gemischen durchgeführt, um die Mindestzündspannungen zu messen und um Aufschluß über die Zündwahrscheinlichkeit bei bekannten Spannungen und Kapazitäten zu gewinnen. Es wurde untersucht, ob für die Zündung von explosiblen Gemischen die Funkenspannung, die elektrische Energie des geladenen Kondensators oder die an das explosive Gas-Luft-Gemisch abgegebene Wärmeenergie des Funken maßgebend ist. Es ergab sich, daß nur die letzterwähnte Energiemenge für den Zündereignis entscheidend ist.

### Bisherige Ansichten

Durch Funkenentladungen können explosive Gas- oder Dampf-Luft-Gemische gezündet werden. Über die Frage, welcher Faktor in der Hauptsache die Zündfähigkeit des Funken bedingt, bestehen zur Zeit noch wesentliche Meinungsverschiedenheiten. Nach W. Jost<sup>2)</sup> schreibt der Ionisation fast keine Wirkung, der Wärme eine Teilwirkung, der Molekülaregung und evtl. Dissoziation im Funken aber eine erhebliche Wirkung auf die Zündfähigkeit zu.

Taylor-Jones, Morgan u. Wheeler<sup>3)</sup> nehmen an, daß die Zündung von Gasgemischen vor allem davon abhängt, ob ein genügendes Gasvolumen auf Entzündungstemperatur erhitzt wurde. Daraus folgt, daß die Wärmeenergie der Zündquelle am geringsten sein kann, wenn die Wärme momentan geliefert wird.

Thornton nimmt an, daß die Bedeutung des Zündstromes darin besteht, Ionen zu erzeugen. Die Wechselwirkung zwischen diesen Ionen führt zur Zündung und zur folgenden Flammenfortpflanzung. Finch u. Thompson<sup>4)</sup> zeigten jedoch auf spektrographischem Wege, daß die Zündung und Verbrennung von explosiblen Gemischen von Kohlenoxyd und Luft nicht durch eine vorausgehende Ionisation des Kohlenoxyds hervorgerufen wurde.

Finch u. Bradford<sup>5)</sup> vertreten den Standpunkt, daß die Verbrennung bestimmt wird durch die Bildung einer genügenden Anzahl von geeignet angeregten Molekülen. (Activation theory of ignition.)

Thornton<sup>6)</sup> bringt seine Versuchsergebnisse bei Zündversuchen mit explosiblen Ätherdampf-Luft- und Ätherdampf-Sauerstoff-Gemischen durch Überschlagfunken an Zündkerzen und durch Öffnungslichtbögen induktiver Stromkreise in Einklang mit der Anschauung, daß für die Zündung die an der Funkenstrecke zur Verfügung stehende Spannung maßgebend ist, nicht die Wärmeenergie.

H. Nitka<sup>7)</sup> hat bei Zündversuchen mit explosiblen Schwefelkohlenstoffdampf-, Benzindampf- und Ätherdampf-Luft-Gemischen versucht, die Frage zu klären, ob zur Zündung die Energie des Funken, die Funkenspannung oder die im Funken transportierte Ladung maßgebend ist. Er kommt zum Ergebnis, daß für die Zündfähigkeit eines Funken die Funkenenergie verantwortlich

ist. Dieser Darstellung liegt die Anschauung zugrunde, daß die gesamte elektrische Energie des geladenen Kondensators als Funkenenergie in der Funkenbahn in Erscheinung tritt. Frühere Versuche von W. Kaufmann<sup>8)</sup> hatten jedoch ergeben, daß die Funkenwärme nur einen kleinen Bruchteil der elektrischen Gesamtenergie beträgt. Dieser Bruchteil nimmt bei gleicher elektrischer Gesamtenergie mit abnehmender Funkenspannung ab.

Durch Zündversuche sollte zunächst festgestellt werden, wie der Zündvorgang durch verschiedene Versuchsbedingungen beeinflußt wird.

### Versuchsanordnungen

Zunächst wurde für die Gas-Luft-Gemischzündungen eine gasdichte Explosionsbombe von 4 l Inhalt benutzt. Die Bombe war auf der Vorderseite mit einer Cellophanfolie verschlossen, die mittels Holzrahmens gegen eine Gummidichtung gedrückt wurde. Diese Cellophanfolie diente als Ausblaswand, um die Entstehung hoher Explosionsdrücke und damit eine Zerstörung der Bombe zu verhindern. Die zugeführte abgemessene Gasmenge strömte durch einen oberen Gashahn langsam in die Explosionsbombe. Die Zündungen des explosiblen Gemisches erfolgten unter Atmosphärendruck. In der Mitte des Kastens befanden sich die Elektroden, die eine war mit Bernstein isoliert, die andere geerdet. Es wurden Elektroden verschiedener Form benutzt. Ein Mischflügel in der Bombe sorgte für gleichmäßige Durchmischung der Gase vor der Zündung.

Um den Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes und der Temperatur des Gas-Luft-Gemisches auf die Zündung zu ermitteln, wurden weitere Zündversuche in einer Explosionsbombe von 5,3 l Inhalt ausgeführt, Bild 1. Die Bombe besaß einen inneren Durchmesser von 12,8 cm. Als Elektroden dienten zunächst Messingkugeln mit 2 cm Dmr. Sie befanden sich in der Mitte der Bombe einander gegenüber und konnten durch eine Mikrometerschraube einander genähert werden. Die eine Elektrode war ebenfalls mit Bernstein isoliert, die andere geerdet. Die Explosionsbombe war vorn mit einer doppelten Cellophanfolie verschlossen, die bei jeder Explosion zerstört wurde. Mit der Explosionsbombe war ein Mischkasten von 12,2 l Inhalt durch zwei Rohre verbunden. In diesem Mischkasten befanden sich ein explosionssicherer Drehstrommotor zum Antrieb eines Mischflügels, ein Feuchtigkeitsmesser und ein Thermometer. Thermometer und Feuchtigkeitsmesser konnten von außen durch ein Glasfenster abgelesen werden. Weiter war ein Manometer an das Gefäß angeschlossen. Mittels Vakuumpumpe wurden 30% der Luft aus dem Gesamttraum der Versuchsanordnung (Mischkasten und Explosionsbombe) herausgepumpt und durch Wasserstoff aus den handelsüblichen Stahlflaschen ersetzt. Die Gemischzusammensetzung wurde an einigen Proben bestimmt:

1. Probe: 27,5% H<sub>2</sub> 14,1% O<sub>2</sub> 57,6% N<sub>2</sub> 0,04% CO<sub>2</sub> 0,75% CO
2. Probe: 27,6% H<sub>2</sub> 12,6% O<sub>2</sub> 58,9% N<sub>2</sub> 0,05% CO<sub>2</sub> 0,90% CO
3. Probe: 29,1% H<sub>2</sub> 14,0% O<sub>2</sub> 56,6% N<sub>2</sub> 0,06% CO<sub>2</sub> 0,24% CO

<sup>1)</sup> W. Kaufmann, Ann. Physik 60, 653 (1897).

<sup>2)</sup> Gekürzte Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Berlin 1943.

<sup>3)</sup> W. Jost: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Julius Springer, Berlin 1939.

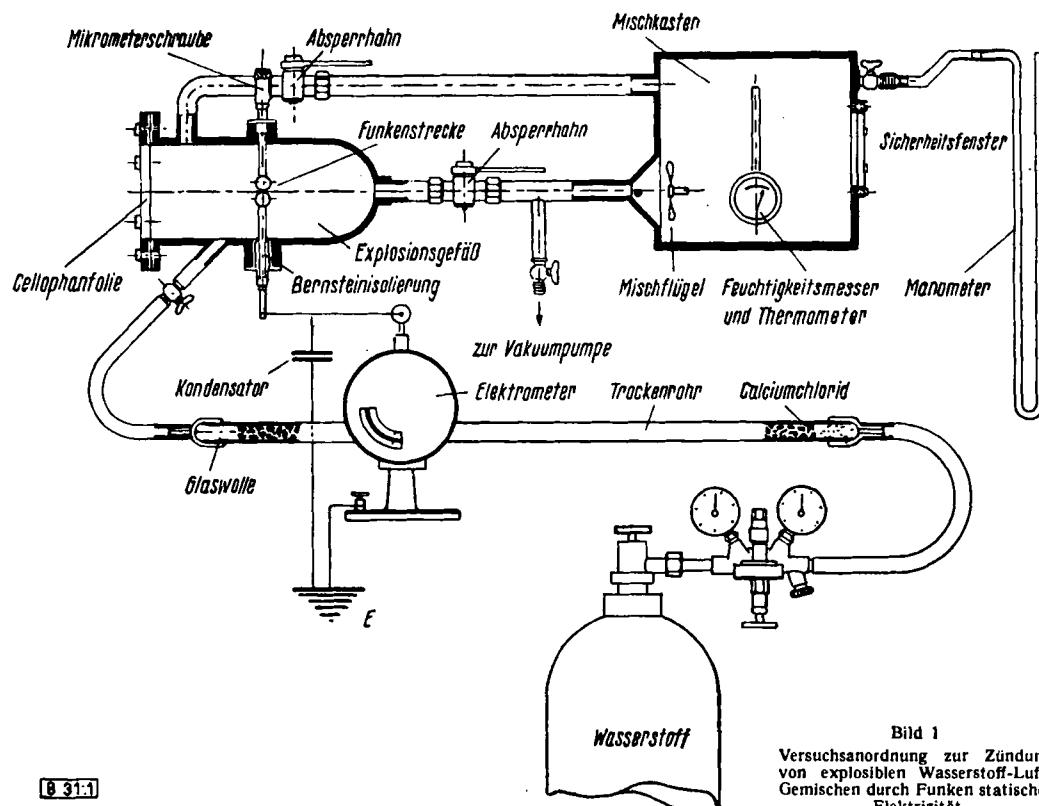
<sup>4)</sup> Philos. Mag. J. Sci. 4, 359 (1922).

<sup>5)</sup> Proc. Roy. Soc. [London] 129, 314 (1930).

<sup>6)</sup> Chem. Reviews 27, 221 (1937).

<sup>7)</sup> Elektrotechn. Z. 60, 342 (1939).

<sup>8)</sup> H. Nitka: Über die Entstehung, die Beseitigung und die Gefährlichkeit elektrostatischer Aufladungen. Verlag Chemie, Berlin 1941.



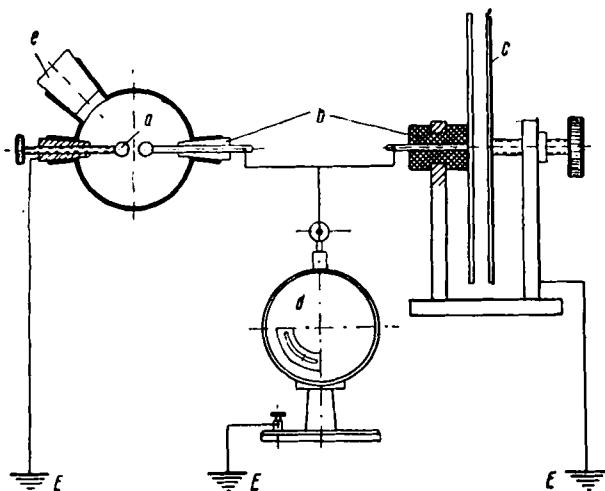
B 31.1

Bild 1  
Versuchsanordnung zur Zündung von explosiven Wasserstoff-Luft-Gemischen durch Funken statischer Elektrizität

Vor dem Eintritt des Wasserstoffs in die Versuchsanordnung wurde das Gas durch ein Rohr mit Calciumchlorid und Glaswolle geleitet, um es weitgehend von Feuchtigkeit und Staubteilchen zu befreien. Die Menge des zugeführten Wasserstoffs schwankte geringfügig mit dem äußeren Atmosphärendruck. Durch den Mischflügel wurde über die beiden Verbindungsrohre zwischen Explosionsgefäß und Mischkasten eine hinreichend gute Durchwirbelung des Wasserstoff-Luft-Gemisches erzielt. Den Nachweis dafür erbrachten auch die Analysen von Gasproben, die an verschiedenen Stellen der Versuchsanordnung entnommen wurden. Nachdem das Wasserstoff-Luft-Gemisch gleichmäßig durchmischt worden war, wurden die Gashähne zwischen Mischkasten und Explosionsgefäß geschlossen, um zu verhindern, daß die Explosion in der Bombe auch auf den Mischkasten übertragen wurde.

Um auftretende Funkenverzögerungen auszuschalten, wurde die Funkenstrecke mit einer Bogenlampe bestrahlt.

Zündversuche mit explosiven Schwefelkohlenstoffdampf-Luft-Gemischen wurden in einer Explosionspipette von 300 cm<sup>3</sup> Inhalt mit Messingspitzen-Elektroden ausgeführt. Die Versuchsanordnung ist in Bild 2 dargestellt.



B 31.2

Bild 2  
Versuchsanordnung zur Zündung explosiver Gas-Luft-Gemische durch Funken statischer Elektrizität  
a verstellbare Elektrode (Messingkugeln)  
b Bernsteinisolierung  
c verstellbare Platte des Kondensators  
d Elektrometer  
e Sicherungsstopfen

Mit der Influenzmaschine wurden verschiedene große Kondensatoren negativ aufgeladen. Bei der Aufladung der Kondensatoren wurde der Elektrodenabstand so eingestellt, daß keine Funken über-

schlagen konnten. Nach Aufladung der Kondensatoren wurde die Influenzmaschine abgeschaltet, um eine einwandfrei bestimmte Elektrizitätsmenge für die Zündversuche zu erhalten. Die Elektroden wurden dann einander so weit genähert, bis Funkenüberschlag erfolgte. Die Entladung der Kondensatoren war vollständig, die zurückbleibenden Ladungen waren so gering, daß sie auch in einem empfindlicheren Meßbereich des benutzten Elektrometers nicht meßbar waren. Die Schlagweite der Funken wurde an der Mikrometerschraube und die Spannung mit dem Wulf-schen Einfaden-Elektrometer bestimmt. Die Mikrometerschraube besaß eine Ganghöhe von 0,5 mm; 0,01 mm konnte einwandfrei abgelesen werden. Vor und nach jeder Zündung wurde der Nullpunkt der Mikrometerschraube bestimmt. Wenn der erste Funke das explosive Gas-Luft-Gemisch nicht gezündet hatte, wurde es aufs neue durchmischt. Die Zündversuche wurden so lange fortgesetzt, bis Zündung eintrat.

### Versuchsergebnisse

#### Zündversuche mit Messingkugel-Elektroden

Zunächst wurde eine Versuchsreihe mit einem 30%igen Wasserstoff-Luft-Gemisch aufgenommen, Bild 3. Jeder eingetragene Meßpunkt stellt die geringste Spannung dar, die bei etwa 20 Zündungen bei der zugehörigen Kapazität gefunden wurde. Während die Kapazität des Entladungskreises von 4815 cm auf 36 cm zurückgeht, steigt die Zündspannung nur von 1770 auf 2390 V. Außerdem wurden noch Wasserstoff-Luft-Gemische anderer Konzentration untersucht, Bild 3. Das 30%ige Gas-Luft-Gemisch entspricht dem stöchiometrischen Gemisch. Am wenigsten zündwillig sind die Gemische mit 10% und 70% Wasserstoff-Gehalt. Diese Kurven bestätigen die anderweitig beobachtete Tatsache, daß man zur Zündung um so höhere Energie aufwenden

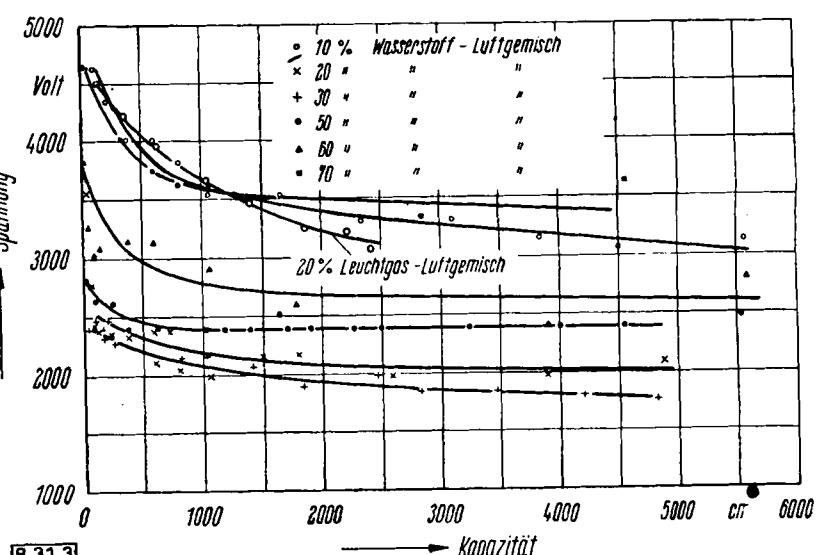


Bild 3  
Abhängigkeit der Zündspannung verschiedener Wasserstoff-Luft-Gemische von der Kapazität des Entladungskreises  
Zum Vergleich Werte für 20%iges Leuchtgas-Luft-Gemisch eingetragen

muß, je weiter man sich von dem optimalen Gemisch entfernt. Bei den 10%igen Gas-Luft-Gemischen war es eigentlich, daß bei den Explosionen nicht immer vollständige Verbrennung erreicht wurde, sondern daß häufig Teilexpllosionen auftraten. Die an einer Stelle eingeleitete Explosion konnte sich nicht in dem

noch unverbrannten Gemisch fortpflanzen, da die hierfür notwendige Temperatur nicht erhalten blieb. Die erzeugte Wärme wurde schneller abgeleitet, als die Nachbarschichten die Entzündungstemperatur erreicht hatten. Bei diesen Gemischen trat überdies ein Zündverzug auf. Wenn die Explosion in einem sehr kleinen Teilvolumen dieses wasserstoff-armen Gemisches einsetzt, so pflanzt sie sich nach Untersuchungen von R. V. Wheeler<sup>10</sup>) sehr viel langsamer fort als in den entzündlichsten Gemischen. Im ganzen zeigen alle Zündkurven den gleichen Verlauf. Die erforderliche Zündspannung steigt nur wenig bei abnehmender Kapazität.

Bild 3 enthält zum Vergleich die Werte einer Versuchsreihe mit 20%igem Leuchtgas-Luft-Gemisch.

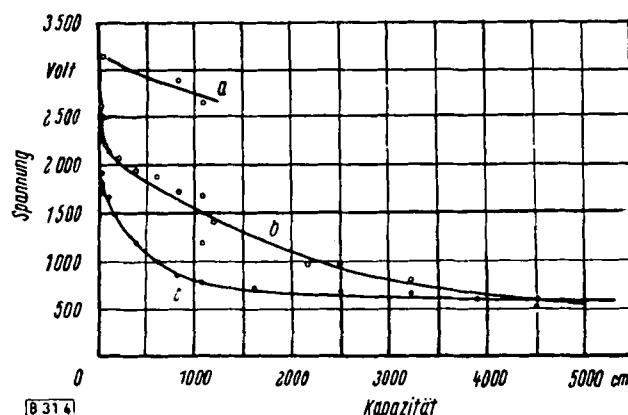
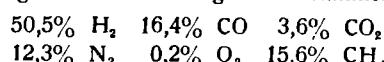


Bild 4

Abhängigkeit der Zündspannungen, die die Zündung regelmäßig auslösen, von der Kapazität des Entladungskreises  
 a 30%iges Wasserstoff-Luft-Gemisch, Elektroden: Messingkugeln  
 b 50%iges Wasserstoff-Luft-Gemisch, Elektroden: Bleispitzen (Mindestzündspannungen)  
 c 50%iges Wasserstoff-Luft-Gemisch, Elektroden: Messingkugeln mit Spitzen (Mindestzündspannungen)

Das Leuchtgas hatte etwa folgende Zusammensetzung:



Die Zündkurve zeigt den gleichen Verlauf wie die Zündkurven für die verschiedenen Wasserstoff-Luft-Gemische.

In den bisher dargestellten Kurven waren die Mindestzündspannungen bei festen Kapazitäten aufgetragen, die gerade noch zur Zündung führten. In Bild 4 sind die Zündspannungen aufgetragen, die bei den angegebenen Kapazitäten die Zündung regelmäßig auslösten. Wie der Verlauf der Kurve in Bild 4 erkennen läßt, nimmt auch hier die Zündspannung nur wenig mit zunehmender Kapazität ab.

#### Zündversuche mit Spitzen-Elektroden

Für eine Versuchsreihe mit 50%igem Wasserstoff-Luft-Gemisch wurden abgestumpfte Bleispitzen als Elektroden verwandt, Kurve b in Bild 4. Die Spannungen, die jetzt zur Zündung ausreichten, lagen erheblich niedriger als bei allen Gasgemischen, die mit Kugelektroden gezündet wurden. Wenn wir den Gesamtverlauf dieser Kurve betrachten, fällt auf, daß die Zündspannung mit abnehmender Kapazität stärker zunimmt als bei den entsprechenden Kurven mit Kugel-Elektroden.

Kurve c in Bild 4 zeigt die Zündspannungen eines 50%igen Wasserstoff-Luft-Gemisches mit Messingkugel-Elektroden, die mit 3 mm langen dünnen Spitzen versehen waren. Diese niedrigen Spannungen sind für den Praktiker besonders wichtig; denn für praktische Anwendungen kommt es darauf an, daß die Zündspannungen unter solchen Bedingungen bestimmt werden, unter denen möglichst leicht Zündung erfolgt. Bei 25 cm Kapazität betrug die Zündspannung nur 1900 V.

Die Zündversuche mit explosiblen Schwefelkohlenstoffdampf-Luft-Gemischen mit Messingspitzen-Elektroden erbrachten im wesentlichen die gleichen Ergebnisse wie die Zündversuche mit Wasserstoff-Luft-Gemischen.

#### Zündversuche mit erhöhtem elektrischen Widerstand im Entladungskreis

Der elektrische Widerstand im Entladungskreis war bei den geschilderten Versuchen gering. Für gut leitende Verbindungen der einzelnen Teile des Entladungskreises war gesorgt. Es wurde

<sup>10</sup>) R. V. Wheeler, J. chem. Soc. Lond., 1920, 915 [1920].

dann zusätzlich Widerstand in den Kreis geschaltet. Die Widerstände wurden von 0 auf 10000 Ω und weiter auf 10<sup>7</sup> Ω gesteigert. Als Widerstände wurden hochohmige Radiowiderstände benutzt und ein angefeuchteter Wollfaden, dessen Widerstand jeweils gemessen wurde. Eine Versuchsreihe wurde mit der konstanten Kapazität von 1062 cm ausgeführt, Bild 5. Trat bei einer Entladung Zündung ein, so war die Restladung des Kondensators praktisch gleich Null. Erfolgte keine Zündung, so blieb eine meßbare Restladung zurück. Beim Widerstand von 0 Ω betrug die Zündspannung 2390 V; bei 10<sup>7</sup> Ω 2890 V. Die Zündspannung steigt also um 500 V an<sup>11</sup>).

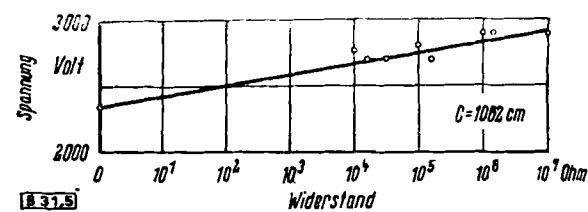


Bild 5  
Zündspannung für ein 50%iges Wasserstoff-Luft-Gemisch bei verschiedenen hohen Widerständen im Entladungskreis

#### Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Funkenspannung

Bei den vorstehend beschriebenen Versuchen hat sich herausgestellt, daß bei Unterschreitung einer bestimmten Grenzspannung praktisch keine Zündung und bei Überschreitung einer anderen bestimmten Grenzspannung fast immer Zündung des Wasserstoff-Luft-Gemisches erfolgt. Um die Zündvorgänge in dem Bereich zwischen diesen beiden Grenzspannungen zu untersuchen, wurden erneut Zündversuche mit Kugel-Elektroden ausgeführt. Hierbei wurde von jedem einzelnen Funken, gleichgültig, ob er zündete oder nicht, Funkenspannung und Schlagweite, von dem Wasserstoff-Luft-Gemisch Temperatur und Feuchtigkeit und außerdem die Höhe des Barometerstandes, bei dem die Zündversuche durchgeführt wurden, zusammengestellt. Zu diesen Zündversuchen wurde immer ein 30%iges Wasserstoff-Luft-Gemisch benutzt.

Eine erste Versuchsreihe wurde mit einer Kapazität von 25 cm durchgeführt. Als Kondensator diente ein Plattenkondensator, der mit Bernstein isoliert war. Bei einer Funkenspannung von 2270 V hat kein Funke bei dieser Kapazität das Gemisch gezündet. Bei 2930 V zündeten 15 von 30 Funken, bei 3130 V 95% der überschlagenden Funken. Es ist nun nicht so, daß bei einer Funkenspannung oberhalb 3200 V alle Funken zünden. Ein Funke z. B. zündete bei einer Funkenspannung von 3440 V das Gemisch nicht.

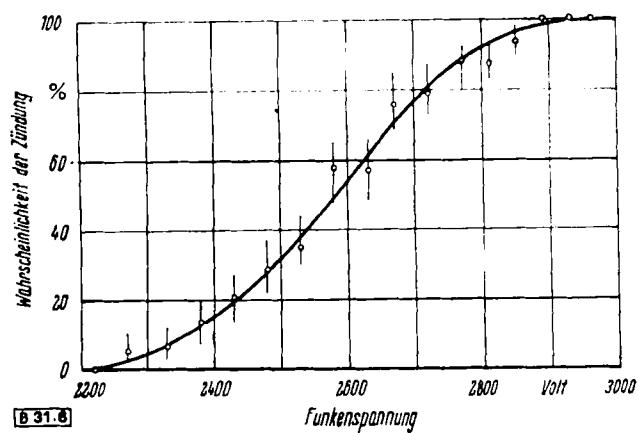
Die relative Feuchtigkeit des Gasgemisches schwankte bei diesen Versuchen von 38 bis 45%, die Gastemperatur von 17,5 bis 35°. Der Barometerstand schwankte von 754 bis 767 mm. Ein Einfluß der Gastemperatur und des Barometerstandes in den angegebenen Grenzen auf den Zündvorgang ließ sich nicht feststellen. Auch die angegebenen Schwankungen der relativen Feuchtigkeit hatten keine merklichen Einfluß<sup>11</sup>).

Eine zweite Reihe mit im ganzen etwa 500 Zündversuchen wurde mit einer Leydener Flasche von 820 cm Kapazität ausgeführt. Der Barometerstand schwankte von 753 bis 773 mm, die Gastemperatur von 15 bis 31,5°, die Feuchtigkeit des Gemisches von 36 bis 44%. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt<sup>12</sup>). Für die Kapazität von 25 cm beginnt die Zündwahrscheinlichkeitskurve bei einer Funkenspannung von 2270 V, für die Kapazität von 820 cm beginnt sie bei einer Funkenspannung von 2220 V. Beide Mindestfunkenspannungen sind nur wenig voneinander verschieden, obwohl die eine Kapazität etwa 33mal größer als die andere ist. Diese Feststellung bestätigt die früheren Ergebnisse,

<sup>10</sup>) Es ist nun nicht unter allen Umständen so, daß die kurzzeitigen Entladungen auch die zündkräftigsten sind. Im Gegensatz zu diesem Ergebnis steht der bekannte Zündversuch mit Schwarzpulver, der nur glückt, wenn die Entladungsdauer durch einen sehr hohen Widerstand im Entladungskreis (angefeuchtete Schnur) erhöht wird.

<sup>11</sup>) Erwähnenswert ist die Beobachtung, daß der erste Funke am Morgen eines Versuchstages, nachdem die Versuchsanordnung die Nacht über unbunutzt gestanden hatte, bei dem ersten Zündversuch besonders regelmäßig die Zündung einleitete. Wenn die Elektroden vor dem Überschlag des ersten Funken nicht besonders gesäubert wurden, war die Schlagweite auffallend groß.

<sup>12</sup>) Die Schwankungen wurden aus der Formel  $\sigma = np(1-p)$  errechnet.  $n$  = Anzahl der Versuche,  $p = \frac{\text{Zahl der Zündungen}}{\text{Zahl der Versuche}}$



B 31.6

Bild 6  
Wahrscheinlichkeit der Zündung eines 30%igen Wasserstoff-Luft-Gemisches in Abhängigkeit von der Funkenspannung (Kapazität 820 cm³)  
Feuchtigkeit des Gemisches etwa 40%  
Zahl der Zündversuche für jeden Kurvenpunkt: 30

daß es für die Zündfähigkeit des Funken nicht wesentlich auf die Kapazitätskomponente ankommt<sup>13)</sup>.

Mit der Kapazität von 820 cm³ sind über 100 weitere Zündversuche durchgeführt worden, bei denen die Versuchsbedingungen in der Weise abgeändert wurden, daß der Elektrodenabstand konstant blieb. Zwischen Kondensator und Funkenstrecke befand sich ein Hebeleinschalter mit einem isolierenden Hartgummigriff. Beim Einschalten des Hebels wurde die Spannung des Kondensators gegenüber dem Potential der Erde an die Funkenstrecke gelegt. So sind z. B. 31 Zündversuche mit einem Elektrodenabstand von 0,45 mm und 30 Zündversuche mit einem Elektrodenabstand von 0,48 mm durchgeführt. Die Ergebnisse enthalten Tabelle 1.

Tabelle 1

Zahl der zündenden und Zahl der nicht zündenden Funken bei den Zündversuchen mit Messing-Kugelelektronen mit festem Elektrodenabstand bei der Kapazität von 820 cm³

Spannung	Elektrodenabstand 0,45 mm		Elektrodenabstand 0,48 mm	
	Zahl der zündenden Funken	Zahl der nicht zündenden Funken	Zahl der zündenden Funken	Zahl der nicht zündenden Funken
2810 V	—	1	—	1
2850 V	1	7	1	2
2890 V	—	4	3	5
2930 V	2	10	10	4
2960 V	3	3	4	—

Danach besitzen die verhältnismäßig hohen Funkenspannungen, die bei dem entsprechenden normalen Elektrodenabstand fast regelmäßig die Zündung auslösten, um so geringere Wahrscheinlichkeit für die Zündung, je kleiner der eingestellte Elektrodenabstand ist. Bei Zündungen mit festem Elektrodenabstand traten häufig Zündverzüge auf.

Die Ergebnisse einer dritten Versuchsreihe mit 1062 cm³ Kapazität enthält Bild 7.

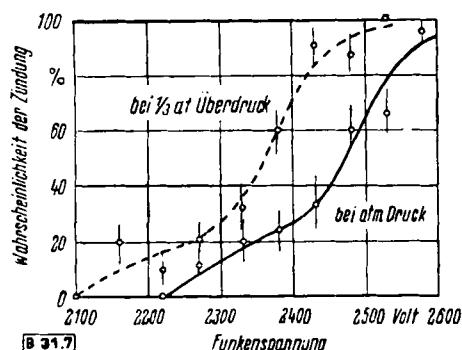
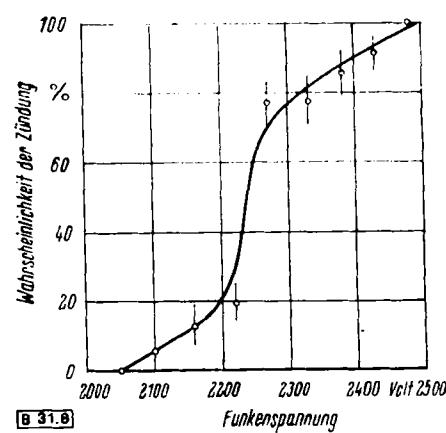


Bild 7

Wahrscheinlichkeit der Zündung eines 30%igen Wasserstoff-Luft-Gemisches in Abhängigkeit von der Funkenspannung (Kapazität 1062 cm³)  
Feuchtigkeit des Gasgemisches: etwa 40%  
Zahl der Zündversuche für jeden Kurvenpunkt: 30  
Messing-Elektrode

Eine andere Versuchsreihe wurde mit der großen Kapazität von  $9 \cdot 10^5$  cm³  $\cdot 1 \mu\text{F}$  durchgeführt. Bereits bei 310 V Funkenspannung wurde die Zündung des Gemisches eingeleitet. Hierbei

<sup>13)</sup> Die Messing-Kugelelektronen wurden nach jeder Explosion mit feinem Schmiergelpapier gesäubert, um die Bildung einer Oxyd-Schicht zu verhindern. Merkliche Unterschiede bei Zündversuchen mit gesäuberten und oxydierten Elektroden ließen sich aber nicht feststellen.



B 31.8

Bild 8  
Wahrscheinlichkeit der Zündung eines 30%igen Wasserstoff-Luft-Gemisches in Abhängigkeit von der Funkenspannung (Kapazität 1062 cm³)  
Zink-Elektroden  
Feuchtigkeit des Gasgemisches: etwa 40%  
Zahl der Zündversuche für jeden Kurvenpunkt: 35

zündeten 16% der überschlagenden Funken. Der kleinste Elektrodenabstand, der der Spannung von 310 V entsprach und noch zur Zündung führte, betrug 0,02 mm. Bei dieser großen Kapazität ist die Mindestzündspannung etwa auf ein Sechstel des Spannungswertes bei 25 cm Kapazität gesunken. Bei der Entladung dieser größeren Elektrizitätsmengen ist eine auffällige Veränderung der Elektrodenoberflächen (Korrosion, Schmelzspuren) nicht aufgetreten.

Die Spannungsbereiche, die durch die Spannungen begrenzt sind, bei denen einerseits keine Zündung und andererseits fast regelmäßige Zündung erfolgt, wurden um so kleiner, je größer die benutzten Kapazitäten waren, Tabelle 2.

Kapazität cm³	Spannungsbereich V
25	2300—3200
820	2250—2850
1062	2250—2600
$9 \cdot 10^5$	300—600

Tabelle 2

Spannungsbereiche, in denen die Zündwahrscheinlichkeit des Funken von 0 auf 100% ansteigt, in Abhängigkeit von der Kapazität

Für weitere Zündversuche wurden Zink-Kugelelektronen mit 2 cm Dmr. benutzt. Für gleiche Funkenspannungen wichen die Schlagweiten in den Wasserstoff-Luft-Gemischen zwischen Zink-Kugelelektronen einerseits und Messing-Kugelelektronen andererseits nicht voneinander ab<sup>14)</sup>. Die Zündversuche wurden mit 1062 cm³ Kapazität durchgeführt. Die Kurve der Zündwahrscheinlichkeit, Bild 8, ist nach kleineren Funkenspannungen verschoben, wenn man sie mit der Kurve vergleicht, die bei derselben Kapazität mit Messing-Kugelelektronen erhalten wurde.

Die bisher beschriebenen Versuche wurden bei Atmosphärendruck durchgeführt. Es wurden dann Zündversuche mit Messing-Kugelelektronen mit der Kapazität von 1062 cm³ unter  $\frac{1}{3}$  atm Überdruck durchgeführt. Die Zündungen erfolgten jetzt bei geringerer Funkenspannung als bei den Versuchen unter Atmosphärendruck, Bild 7. Die Schlagweiten waren bei den Zündungen mit Überdruck für gleiche Spannungen kleiner als bei den Versuchen unter Atmosphärendruck, Tabelle 3.

Tabelle 3  
Zündungen unter atm. Druck und unter  $\frac{1}{3}$  atm Überdruck

Funkenspannung V	Schlagweite mm atm. Druck	Schlagweite mm $\frac{1}{3}$ atm Überdruck
2270	0,44	0,31—0,37
2330	0,52—0,53	0,31—0,39
2380	0,46—0,58	0,32—0,41
2430	0,46—0,51	0,34—0,39
2480	0,50—0,51	0,35—0,41

Diese Versuche erbrachten das Ergebnis, daß die Schlagweite der Funken und damit das Funkenvolumen allein nicht für den Zündvorgang ausschlaggebend sind. Das erforderliche Mindestfunkenvolumen kann herabgedrückt werden, wenn man die Zündungen unter Überdruck durchführt. Offenbar ist die Zahl der Wasserstoff-Moleküle, die sich in der Funkenbahn befinden, für den Zündvorgang von Bedeutung.

<sup>14)</sup> Bei den Zink-Kugelelektronen wurde nicht die Erscheinung beobachtet, daß der erste Funke in der Versuchsreihe eines Tages wegen seiner großen Schlagweite für die Einleitung der Zündung besonders günstig war.

Um die Schwankungen in den Schlagweiten der Funken bei gleichen Funkenspannungen herabzusetzen, wurde bei den weiteren Versuchsreihen die Funkenstrecke mit einer Bogenlampe angestrahlt. Zu diesen Versuchen wurde elektrolytisch hergestellter Wasserstoff benutzt.

Die Analysen von Gemischproben, die an verschiedenen Stellen der Versuchsanordnung entnommen wurden, hatten folgendes Ergebnis:

Probe	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1 .....	29,5%	0,0%	0,0%
2 .....	29,7%	0,0%	0,0%

Die Analysen bewiesen aufs neue die Gleichmäßigkeit der Gemischzusammensetzung. Im Gegensatz zu den früheren Proben enthielten diese Proben kein Kohlenoxyd.

Die Kapazität des Funkenentladungskreises betrug bei diesen Zündversuchen 1065 cm. Bei einer Funkenspannung von 2160 V zündeten 3,3%, bei 2380 V zündeten 92% aller Funken. Die Feuchtigkeit des Gas-Luft-Gemisches schwankte von 40 bis 44%.

Bei weiteren Zündversuchen wurde die Feuchtigkeit des Gemisches durch Calciumchlorid weitgehend herabgesetzt. Bei 2220 V zündeten bei diesen Versuchen 8%, bei 2380 V 96% aller Funken, Bild 9. Diese Kurve verläuft steiler. Der Spannungsbereich, in dem die Zündwahrscheinlichkeit eines Funken von 0 auf 100%

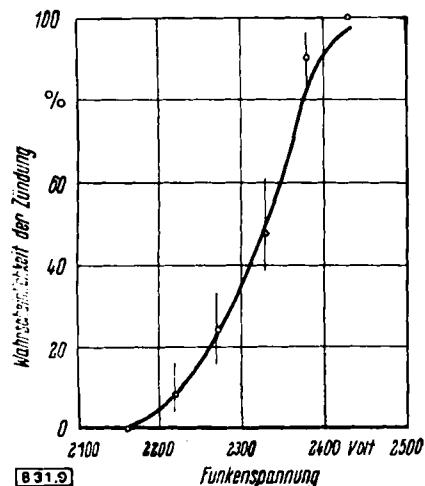


Bild 9 (links)  
Wahrscheinlichkeit der Zündung eines 30%igen Wasserstoff-Luft-Gemisches in Abhängigkeit von der Funkenspannung  
Funkenstrecke mit einer Bogenlampe bestrahlt  
Kapazität 1065 cm, Messing-Kugelelektroden  
Gemisch durch Calciumchlorid weitgehend getrocknet  
Zahl der Zündversuche für einen Kurvenpunkt: 20

ansteigt, beträgt rd. 200 V. Bei den Zündversuchen mit nicht bestrahlter Funkenstrecke erstreckte sich dieser Bereich auf 400 V. Der Zündvorgang ist also regelmäßiger geworden. Die Mindestzündspannungen sind von 2260 V auf 2220 V bzw. auf 2160 V gesunken.

#### Auswertung der Versuchsergebnisse

Bild 3, in dem die Abhängigkeit der Mindestzündspannung von der Kapazität dargestellt ist, zeigt, daß die elektrische Energie des geladenen Kondensators nicht allein für den Zündereignis maßgebend sein kann. Drückt man in der Formel  $E_K = \frac{1}{2} CV^2$  alle Größen in CGS-Einheiten aus, so wird der Wert der Arbeit in erg angegeben. Wenn ein Kondensator von 4815 cm Kapazität auf 1770 V = 1770 : 300 elektrostatische Spannungseinheiten aufgeladen ist, so beträgt seine Energie 83820 erg. Zur Zündung des 30%igen Wasserstoff-Luft-Gemisches müßte immer die gleiche Zündenergie erforderlich sein. Unabhängig von der Wahl der Kapazität müßte das Produkt  $\frac{1}{2} CV^2$  eine Konstante sein. Die Funktion  $y = \frac{1}{2} CV^2 = 83820$  erg ist in Bild 10 graphisch dargestellt, wobei angenommen wurde, daß dies die erforderliche Zündenergie für das 30%ige Wasserstoff-Luft-Gemisch sei. Beim Betrachten des Kurvenverlaufs fällt sofort auf, daß die Kurve für kleine Kapazitäten wesentlich oberhalb der Kurve liegt, die die Beobachtungsreihe darstellt.

Auch bei den Zündungen von explosiven Schwefelkohlenstoff-dampf-Luft-Gemischen wurde das gleiche Ergebnis festgestellt.

Die Versuchsergebnisse lehren anderseits weiter, daß die an der Funkenstrecke zur Verfügung stehende Spannung auch allein nicht für den Zündereignis maßgebend ist. Zum Zünden des 30%igen Wasserstoff-Luft-Gemisches war bei einer Kapazität von 25 cm eine Mindestspannung von 2320 V erforderlich. Bei der großen

Kapazität von 1 μF betrug die Mindestzündspannung nur 310 V. Zu beiden Zündversuchen wurde die gleiche Versuchsanordnung benutzt.

Um zu klären, inwieweit man die Zündung des explosiven Gas-Luft-Gemisches als einen thermischen Vorgang auffassen kann, wurde die Funkenwärme des Entladungsfunkens gemessen.

Zu diesen Versuchen diente im wesentlichen die Versuchsanordnung, die W. Kaufmann<sup>7</sup>) beschreibt, Bild 11. Aus den Versuchen von Kaufmann ergibt sich, daß die Funkenwärme nur einen geringen Anteil der Gesamtenergie ausmacht und daß dieser Anteil mit zunehmendem Widerstand der Anordnung weiter abnimmt. Der Anteil der Funkenwärme wächst mit steigendem Entladungspotential, Tabelle 4.

Tabelle 4

Anteil der Funkenwärme eines Entladungsfunkens an der Gesamtenergie des geladenen Kondensators (nach W. Kaufmann)

Kap. cm	Funkenpot. V	Gesamtwärme cal	Funkenwärme cal	Anteil der Funkenwärme in %
43220	6870	0,271	0,016	5,90
43220	9080	0,471	0,040	8,49
43220	11300	0,735	0,070	9,52
43220	13609	1,06	0,116	10,94
43220	15700	1,42	0,17	11,97

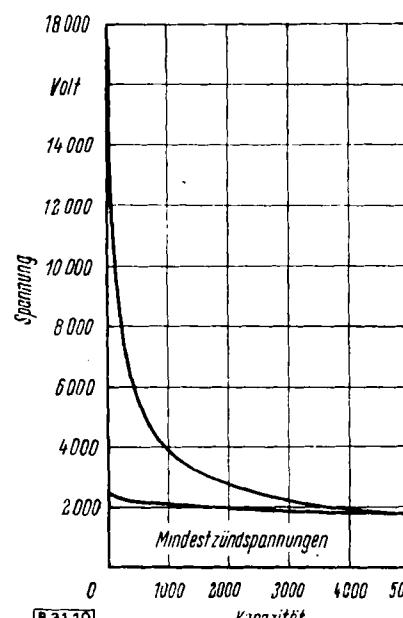


Bild 10 (rechts)  
Errechnete Spannungen bei gleichbleibender Zündenergie in Abhängigkeit von der Kapazität nach der Formel

$$V = \sqrt{\frac{2k}{C}}$$

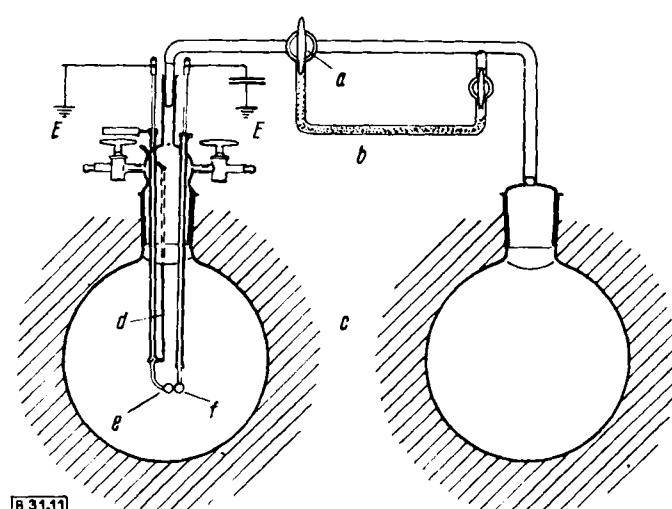


Bild 11  
Versuchsanordnung zur Bestimmung der Funkenwärme  
a Dreiegehahn, b Kapillarrohr mit Xylo tropfen 2,5 mm Dmr., c Holzwolle,  
d Heizdraht, 20 Ω, e verstellbare Elektrode, f feste Elektrode

Da bei den zur Zündung benutzten kleineren Kondensatoren und geringeren Funkenspannungen die Funkenwärme eines einzelnen Funken so gering war, daß kein einwandfrei messbarer Ausschlag des Flüssigkeitstropfens erreicht wurde, wurde die Versuchseinrichtung nach Bild 12 in folgender Weise abgeändert:

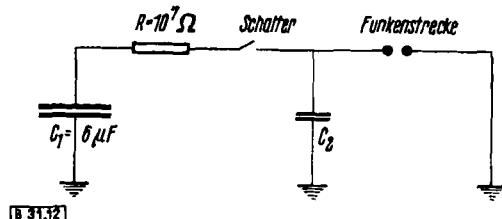


Bild 12

Versuchsanordnung zur Aufladung des Kondensators der Funkenstrecke

Mit der Influenzmaschine wurde der Kondensator  $C_1$  mit einer Kapazität von  $6 \mu F$  bis 6000 V aufgeladen. Über einen Schalter wurde der Kondensator  $C_2$  über einen Widerstand von  $10^7 \Omega$  aufgeladen. Die Funkenstrecke in der Versuchsanordnung wurde so eingestellt, daß die elektrische Energie des jeweils benutzten Kondensators vor dem Funkenübergang den gleichen Wert besaß. Die Spannung des großen Kondensators sank während der Messungen von 6000 auf 5000 V. Der zeitliche Abstand  $T$  zweier Funkenentladungen wurde unter der Voraussetzung, daß die Spannung  $V_0$  des Kondensators  $C_1$  konstant blieb, aus der Formel  $T = RC_2 \ln \frac{V_0}{V_0 - V_z}$  berechnet.  $R = 10^7 \Omega$ ,  $V_z$  = Überschlagsspannung für die eingestellte Funkenstrecke.

Es wurden folgende Werte gefunden:

Kapazität cm	Funkenspannung V	Zeitlicher Abstand T zweier Entladungen s
25	4000	$3,05 \cdot 10^{-4}$
100	2000	$4,51 \cdot 10^{-4}$

Die Aufladezeit von  $C_2$  ist also länger als die Zeit der Funkenentladung.

Der Ausschlag des Flüssigkeitstropfens wurde in der Weise geeicht, daß ein dünner Heizdraht von  $20 \Omega$  durch einen Strom konstanter Stärke erwärmt wurde. Es wurde vorausgesetzt, daß die gesamte elektrische Energie in Joulesche Wärme umgewandelt und an die Luft abgegeben wird. Man erhält die in der Zeit  $t$  in Form von Wärme entwickelte Arbeit aus der Formel  $\Omega = 0,239 \cdot t^2 \cdot R \cdot t$  [cal]. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Aus diesen Werten geht hervor, daß die Funkenwärme

Mit einer anderen Versuchsanordnung wurde die Temperaturerhöhung der Luft durch Funken statischer Elektrizität in einem konstanten Abstand von der Funkenstrecke mit einem Thermoelement gemessen. Zu diesen Messungen wurde ein Silber-Konstantan-Element benutzt. Die Versuche wurden in einer Glaspipette von  $300 \text{ cm}^3$  Inhalt mit Messing-Kugel- und Messing-Spitzen-elektroden ausgeführt. Die Kugelelektroden hatten einen Durchmesser von 1 cm. Zu diesen Versuchen wurde ein Moll'sches Galvanometer mit einer Stromempfindlichkeit von  $7,8 \cdot 10^{-11} \text{ A}$  je Skalenteil benutzt. Die Temperaturerhöhung der Luft bei den Funkenübergängen ist in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Ergebnisse bestätigen das bereits angeführte Ergebnis, daß die Temperaturerhöhung in gleichem Abstand von der Funkenstrecke um so beträchtlicher ist, je größer bei gleicher elektrischer Gesamtenergie die Funkenspannung eines einzelnen Funken ist. Die Ausschläge des Galvanometers waren bei Verwendung von Spitzen-elektroden weitaus größer als bei Kugelelektroden. Das Thermoelement mußte in einem größeren Abstand von der Funkenstrecke angebracht und ein höherer Widerstand vor das Galvanometer geschaltet werden, um meßbare Ausschläge zu erhalten. In Übereinstimmung mit diesen Messungen stehen folgende Ergebnisse bei den Zündversuchen:

1. Die Zündung erfolgt bei Spitzelektroden leichter als bei Kugelelektroden.
2. Die Zündung erfolgt bei gleicher elektrischer Energie um so leichter, je höher die Funkenspannung ist.

Die Ergebnisse führen zu dem Schluß, daß die Zündfähigkeit des Funken wesentlich von seiner Wärmewirkung abhängt.

Weiter wurde die Temperaturerhöhung der Elektroden untersucht. Als isolierte Elektrode wurde eine Messing-Spitze verwandt, als geerdete Elektrode diente das Silber-Konstantan-Element. Als Galvanometer wurde ein Multiflex-Galvanometer mit einer Stromempfindlichkeit von  $3,9 \cdot 10^{-9} \text{ A}$  je Skalenteil benutzt. Die Vermutung, daß die Temperaturerhöhung der Elektroden bei kleiner Schlagweite am größten sei, hat sich bestätigt.

Tabelle 5 Wärme des Entladungsfunkens für  $C = 6 \cdot 9 \cdot 10^8 \text{ cm}^2$  und  $R_1 = 10^7 \Omega$ , vgl. Bild 12.

Art des Kondensators	Kap. cm	Energie des Kondensators erg	Spannungsabfall an $C_1$ V	Zeit s	Länge des Xylo-Tropfens mm	Ausschlag mm	Gesamtenergie des Kondensators $C_2$ cal	Funkenenergie cal
Plattenkondensator ..	25	2222	6000—5000	31	15	60	2,867	0,3441
" ..	44	2222	6000—5000	19	17	19	2,171	0,1792
Leydener Flasche ..	100	2222	6000—5000	16	15	10	1,434	0,0700
Leydener Flasche ..	816	19998	6000—5000	17	14	15	1,502	0,0820
" ..	1881	19998	6000—5000	15	14	9	0,994	0,0527

nur einen geringen Anteil der gesamten elektrischen Energie ausmacht. Der Anteil der Funkenwärme geht mit zunehmender Kapazität, d. h. mit abnehmender Funkenspannung, zurück. Bei der Kapazität von 25 cm beträgt der Anteil 12%, bei 44 cm 8,4%, bei 100 cm 4,9%. Bei den Kapazitäten von 816 und 1881 cm waren die Ausschläge so gering, daß eine einwandfreie Messung der Funkenwärme nicht mehr möglich war. Die elektrische Energie einer Entladung beträgt 2222 erg.

Aus Bild 4 ersieht man, daß zur Zündung des explosiven Leuchtgas-Luft-Gemisches bei einer Kapazität von 136 cm eine Mindestzündspannung von 4514 V erforderlich ist, bei 816 cm beträgt die Zündspannung 3768 V, bei 1881 cm 3305 V. Mit der oben beschriebenen Versuchsanordnung wurde der Anteil der Funkenwärme für diese Zündspannungen ermittelt. Durch Rechnung ergeben sich Energien der zündenden Funken nach Tabelle 6.

Tabelle 6

Errechnete Funkenenergien bei den gemessenen Zündspannungen bei verschiedenen Kapazitäten für ein Leuchtgas-Luft-Gemisch

Kap. cm	Zündspannung V	Energie des geladenen Kondensators erg	Funkenenergie cal
136	4514	15400	$7,03 \cdot 10^{-5}$
816	3768	64360	$1,86 \cdot 10^{-4}$
1881	3305	111600	$1,49 \cdot 10^{-4}$

Zum Vergleich wurden in Tabelle 6 auch die Energien der aufgeladenen Kondensatoren angeführt. Die berechneten elektrischen Energien der Kondensatoren weichen weit mehr voneinander ab als die Funkenenergien, die zur Zündung des explosiven Leuchtgas-Luft-Gemisches notwendig waren.

Oben wurde hervorgehoben, daß die Zündung des Wasserstoff-Luft-Gemisches bei Verwendung von Zink-Kugeln leichter erfolgt als bei Verwendung von Messing-Kugelelektroden, vgl. Bild 7 und 8. Dieses Ergebnis stimmt vom Standpunkt der Wärmetheorie mit den Messungen zur Bestimmung der Funkenwärme von Kaufmann überein. Kaufmann stellte fest, daß die Ausschläge des Luftthermometers bei Anwendung von Zink-Kugeln als Elektroden unter sonst gleichen Umständen größer waren als bei Messing-Kugeln. Das Verhältnis der entwickelten Wärmemengen betrug:

$$\frac{q_{\text{(Messing)}}}{q_{\text{(Zink)}}} = 0,54$$

Die Schlußfolgerung von Taylor-Jones, daß die Wärmeenergie, die von der Zündquelle geliefert werden muß, am geringsten ist, wenn die Wärme momentan geliefert wird, wurde bestätigt.

Weiter seien hier folgende Versuche angeführt: In dem Explosionskasten von 4 l Inhalt befand sich eine Sprühelektrode (scharfe Nähnadel), die mit Bernstein isoliert war. Dieser Spitzegegenüber befand sich in einem Abstand von 30 mm eine geerdete Messing-Scheibe. Die Spitzeg wurde mit einer Influenzmaschine aufgeladen. In normaler Luft war bei 10000 V ein deutliches Lichtbüschel an der Spitzeg zu erkennen, wenn negative Elektrizität ausströmte. Für positive Ladungen besaß die Luft eine geringere Durchlässigkeit, sie strömten mit geringerer Intensität aus. In dem Explosionskasten befand sich bei weiteren Versuchen ein 30%iges Wasserstoff-Luft-Gemisch. Ein Propeller im Kasten sorgte für eine hinreichend gute Durchmischung. In diesem explosiven Gas-Luft-Gemisch wurde eine kräftige Spaltenentladung bei 10000 V erzeugt. Beim Ausströmen von positiven und negativen Ladungen

Tabelle 7 Temperaturerhöhung der Luft bei elektrischen Funkenübergängen.

a) Messing-Kugelektroden.		Abstand des Thermoelementes von der Funkenstrecke: 7 mm. Durchmesser der Kugelektroden: 1 cm. Vorschaltwiderstand: 1000 Ω.						
Art des Kondensators	Kap. cm	Spannung V	Energie eines Funkens	Spannungsabfall an C <sub>1</sub> V	Gesamtenergie des Kondensators C <sub>2</sub> erg	Zeit s	Gesamtausschlag des Galvanometers Skl.	Ausschlag des Galvanometers für 1 · 10 <sup>7</sup> erg. Skl.
Plattenkondensator ..	25	4000	2222	6000—4250	21 · 10 <sup>7</sup>	52	196	9,3
	44	3000	2222	6000—4250	16 · 10 <sup>7</sup>	45	108	6,8
Leydener Flasche ..	100	2000	2222	6000—4250	10,5 · 10 <sup>7</sup>	32	48	4,6
	816	700	2222	6000—4250	3,7 · 10 <sup>7</sup>	26	18	4,8
" ..	1065	613	2222	6000—4250	3,2 · 10 <sup>7</sup>	23	13	4,1

b) Messing-Spitzenelektroden.		Abstand des Thermoelementes von der Funkenstrecke: 20 mm. Vorschaltwiderstand: 8000 Ω.						
Plattenkondensator ..	25	4000	2222	6000—4250	21 · 10 <sup>7</sup>	72	280	13,3
" ..	44	3000	2222	6000—4250	16 · 10 <sup>7</sup>	52	222	13,9
	100	2000	2222	6000—4250	10,5 · 10 <sup>7</sup>	33	77	7,3
Leydener Flasche ..	816	700	2222	6000—4250	3,7 · 10 <sup>7</sup>	27	4	1,1
	1065	613	2222	6000—4250	3,2 · 10 <sup>7</sup>	24	4	1,2

$C_1 = 6 \mu F$     $V_1 = 6000 V$     $R = 10 M\Omega$    Thermoelement: Silber-Konstantan   1 Skl. des Moltischen Galvanometers 7,8 · 10<sup>-11</sup> A.  
4° Temperaturdifferenz geben 200 Skl. Ausschlag bei 5000 Ω Vorschaltwiderstand.

ist bei allen Versuchen keine Zündung dieses zündwilligen Gemisches erfolgt. Nach den Untersuchungen von K. Wesendock<sup>15)</sup> müssen folgende Potentialdifferenzen überschritten sein, wenn die kontinuierliche Spitzenentladung beginnen soll:

Gas	Positive Elektrizität V	Negative Elektrizität V
Luft .....	2500	2100
Wasserstoff .....	1630	1590

Obwohl bei dieser kräftigen Spitzenentladung eine Ionisation des Gemisches bewirkt wird, trat doch keine Zündung ein, weil die Wärmewirkung dieser schwachen Funkenentladung zu gering war.

### Zusammenfassung

- Die Zündfähigkeit von Wasserstoff-Luft-Gemischen hängt von der Gemischzusammensetzung ab. Am zündwilligsten ist das 30%ige Wasserstoff-Luft-Gemisch.
- Die Zündspannung hängt nicht wesentlich von der Kapazität des Entladungskreises ab. Die elektrische Energie der Kondensatoren, die zur Zündung nötig war, ist nicht konstant.
- Der Zündvorgang wird maßgeblich durch die Form der Elektroden beeinflußt. Spitzenelektroden setzen die Mindestzündspannung bei gleicher Kapazität gegenüber Kugelektroden beträchtlich herab.

<sup>15)</sup> Ann. Physik 60, 193 [1897].

4. Die Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden beeinflußte den Zündvorgang nicht wesentlich.

5. Elektrische Widerstände im Entladungskreis erhöhen die erforderliche Zündspannung für Gas-Luft-Gemische.

6. Die Funkenwärme beträgt nur einen geringen Teil der elektrischen Gesamtenergie des geladenen Kondensators. Dieser Anteil geht mit abnehmender Spannung noch weiter zurück.

7. Nach den vorliegenden Versuchen ist die vom Funken an das explosive Gas-Luft-Gemisch abgegebene Wärme für den Zünd-erfolg maßgebend.

Die vorliegende Arbeit wurde ausgeführt in der physikalischen Abteilung der Chemisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, Herrn Prof. Dr. Chr. Gehrtsen für die vielseitige Unterstützung meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen. Besonders danke ich auch dem Präsidenten der Chemisch-Technischen Reichsanstalt, Herrn Prof. Dr. Rimarski, der mir in entgegenkommender Weise Mittel für den Kauf und Bau von Geräten zur Verfügung stellte. Dankend möchte ich den Abteilungsleiter Oberregierungsrat Dr. Schneider und Oberregierungsrat Dr. Finger erwähnen, die mir bei der Durchführung der Untersuchung ihre Unterstützung zuteil werden ließen. Ebenso danke ich meinen technischen Mitarbeitern, die mir bei der Ausführung der Versuché geholfen haben.

Eingeg. 29. Nov. 1944 [B 31]

## Nomogramm zur Bestimmung von Kapillarrohr-Strömungsmessern

Von Dipl.-Ing. R. SCHUMACHER, Karlsruhe

Unter Zugrundelegung des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes und der Hagenbach-Korrektur wurde für Kapillarrohr-Strömungsmesser, die nach dem Differenzdruck-Verfahren arbeiten, ein Nomogramm entwickelt, das eine gute Übersicht über die Verwendungsmöglichkeit alter und über die Baugrößen neuer Strömungsmesser erlaubt.

Bei dem Aufbau von Strömungsapparaten in chemischen Laboratorien tritt jedesmal erneut die Frage auf, welche Art und welche Größe von Strömungsmessern zu verwenden sind. In der Hauptsache wird das Differenzdruck-Verfahren mit Laminarströmung in kapillaren und glatten Röhren bevorzugt, da die auf diesem Prinzip beruhenden Kapillarrohr-Strömungsmesser leicht herzustellen und in die Apparatur leicht einzubauen sind. Ihre Berechnung ist dagegen umständlich und zeitraubend.

Nach dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz

$$128 \cdot V \cdot \eta \cdot L = \pi \cdot D^4 \cdot t \cdot (p_1 - p_2)$$

ist bei Schichtströmung der Druckabfall  $p_1 - p_2$  ( $\text{g/cm} \cdot \text{s}^2$ ) längs Kapillarrohren von dem Durchmesser  $D$  (cm) und der Länge  $L$  (cm) ein unmittelbares Maß für den Mengenstrom  $V$  ( $\text{cm}^3$ ) in der Zeiteinheit  $t$  (s) und ebenso wie die Zähigkeit  $\eta$  ( $\text{g/cm} \cdot \text{s}$ ) von der Dichte praktisch unabhängig.

Bei der allgemein üblichen Bauart der Kapillarrohr-Strömungsmesser wird der Druck aber nicht am Kapillarrohr selbst, sondern an seinen Enden oder in einiger Entfernung davon gemessen, wo sich die Flüssigkeit bzw. das Gas praktisch in Ruhe befinden. Das Hagen-Poiseuillesche Gesetz ist dann mit der Hagenbachschen Korrektur  $\left( \sim 1,12 \frac{\gamma \cdot w^2}{g} \right)$  zu versehen, die die Eintrittsbeschleunigung bis zur parabolischen Geschwindigkeitsverteilung und den Verlust der Geschwindigkeitsenergie am Austritt berücksichtigt.  $\gamma$  spez. Gewicht,  $w$  Geschwindigkeit,  $g$  Erdbeschleunigung.

Um die Strömungsverhältnisse möglichst eindeutig festzulegen, wird für die Kapillarrohr-Strömungsmesser seit Jahren ein Modell verwendet, das neben leichter Herstellbarkeit betriebliche Vorteile in Form eines großen Meßbereichs und einer leichten Auswechselbarkeit der Kapillaren und der jeweils benötigten Meßflüssigkeit