

# Über stosserrerregende Partialfunken bei verschiedenen Funkenstrecken.

Von

H. Zickendraht.

---

## I. Beschreibung der Versuche.

Mit der Erfindung der Stosserregung von Schwingungskreisen hat der Nutzeffekt der radiotelegraphischen Stationen eine bedeutende Steigerung erfahren. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn von Seiten der Technik die rationellsten Anordnungen namentlich bezüglich der Funkenstrecke, von Seiten der Wissenschaft die physikalischen Grundlagen des Stossphänomens gesucht werden. Eine Reihe von Untersuchungen der neuesten Zeit befassen sich mit der Aufklärung über die Vorgänge bei Stosserregung, über den Einfluss der Funkenkonstanten und der Eigenschaften der gekoppelten Schwingungskreise auf das Zustandekommen der Wienschen Erscheinung.

Vorliegende Studie soll einen Beitrag zur Kenntnis der komplizierten Bedingungen liefern, die für die Energieübertragung bei Stosserregung massgebend sind, und zwar wird ein besonderes Gewicht auf die Natur der Entladung gelegt, ist doch die Löschwirkung eines Funkens ein Problem des Elektrizitätsdurchganges durch Gase.

Es ist nicht Zweck der im Folgenden durchgeführten Untersuchung, einen Vergleich zwischen der Güte der Stosserregung bei verschiedenen Funkenstrecken (bezüglich Elektrodenmaterial und Gas in der Funkenbahn) zu geben. Das ist bereits von mehreren Forschern zur Genüge geschehen, auch sind diesbezügliche Reihen wiederholt aufgestellt worden. Vielmehr soll auf verschiedene Formen der oscillatorischen Entladung ein und desselben Kondensatorkreises aufmerksam gemacht werden, die man erhält, wenn man Elektrodenmaterial und Einbettungsgas variiert. Namentlich Zahl und Eigenschaften der Partialfunken, die einen grossen Einfluss auf die Stosserregung ausüben, hängen in hohem Grade von der Natur der Funkenstrecke ab.

Den mir zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln entsprechend, wurden als Elektroden Kugeln aus verschiedenen Metallen benutzt. Nur bei Kupfer und Aluminium standen auch Platten zu Gebote. Als Hochspannungsstromquelle diente ein Klingelfuss'scher 10 cm-Induktor, der mit Gleichstrom und gutem Hammerunterbrecher arbeitete. Die Energie ist also bei allen Versuchen klein; wenn sich aus den gewonnenen Resultaten Folgerungen für die Praxis ziehen lassen, so käme zunächst nur die kleine mit Induktor arbeitende transportable Station in Betracht.

Die Zahl der für das ganze Problem massgebenden Faktoren ist eine so grosse, dass es von vorneherein unmöglich ist, den Einfluss aller gemeinsam zu studieren, infolgedessen wurden einige derselben zunächst konstant gehalten. Zur Beurteilung des Ganzen kommen bekanntlich folgende Grössen in Betracht:

- a) *Primärstrom*, *Primärspannung* und *Unterbrechungszahl* am Induktor, woraus sich die primär aufgewendete Leistung bestimmen lässt. Alle drei Grössen zunächst konstant. (Primärstrom schwach.)
- b) Bestimmungsstücke des Stosskreises: *Kapazität*, *Selbstinduktion* und *Funkenstrecke*. Während Kapazität und Selbstinduktion unverändert blieben, wurde dem Einfluss der *Natur der Funkenstrecke* besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Von der Wahl derselben hängt bei konstanten Schwingungselementen ja der *Stromeffekt* im Kondensatorkreise ab, für welchen *et. par.* *Funkentpotential*, *Funkendämpfung* und *Partialentladungen* massgebend sind. Diese drei Grössen beherrscht man bei konstanter Energie aber durch *Funkenlänge*, *Elektrodenform*, *Elektrodenmaterial* und *Einbettungsgas*, in welchem der Funke übergeht. Funkenlänge und Elektrodenform (Kugeln oder Platten) mussten konstant bleiben, variiert wurden Elektrodenmaterial und Einbettungsgas.
- c) Ein Mass für die Energieübertragung zwischen Stosskreis und angestossenem Schwingungskreise liefert der *Kopplungsgrad*, der in weiten Grenzen veränderlich gehalten worden ist. Er ist nicht nur von Einfluss auf die Grösse der übertragenen Energie, sondern auch in ausgesprochener Weise für die Stosserregung bestimmend. Dabei ist die Art und Weise der Kopplung, ob induktiv, galvanisch, kapazitiv oder direkt nicht gleichgültig. In Anlehnung an die Praxis der Radiotelegraphie wurde zunächst *direkte Kopplung* gewählt.
- d) In der Wahl von *Kapazität* und *Selbstinduktion* beim angestossenen geschlossenen Kreise ist man an die Verhältnisse beim Stosskreis und die an die Kopplungsvariation gestellten Anfor-

derungen gebunden. Im vorliegenden Falle waren Kapazität und Selbstinduktion nur wenig von den entsprechenden Grössen im Stosskreise verschieden, und wurden wie jene konstant gehalten.

Durch obige Zusammenstellung ist das vorliegende Problem enger begrenzt und beschränkt sich auf die Messung von Stromeffekten in zwei gekoppelten Schwingungskreisen im Hinblick auf Stosserregung des zweiten (geschlossenen) bei Variation der Funkenstreckenelemente und des Kopplungsgrades, unter Konstanthaltung der aufgewendeten Primärenergie am Induktor.

Ein vorzügliches Mittel zur Lösung unsrer Aufgabe bieten die von einem Schüler *Brauns* wohl zum ersten Male genauer untersuchten Kopplungskurven.<sup>1)</sup> Sie geben den Stromeffekt im angestossenen Kreise, oder eine dem Stromeffekte proportionale Grösse, als Funktion des Kopplungsgrades und sind wegen ihrer Teilmaxima und -minima höchst interessant. Was für Beziehungen zwischen der Natur der Funkenstrecke und diesen Erhebungen und Senkungen der Kopplungskurven existieren, ist von *Rohmann*<sup>2)</sup> und andern dargestellt worden.

Die im Folgenden benutzte experimentelle Anordnung ist recht einfach; ihr Haupterfordernis zunächst die Möglichkeit raschen Arbeitens und zwar deswegen, weil sich die Funkenstrecke (namentlich bei Kugeln) während des Betriebes infolge unvermeidlicher chemischer Einwirkung der Materialien aufeinander unter dem Einflusse der hohen Funkentemperaturen rasch ändert. Trotz häufiger Reinigung der Elektroden etc. konnten nur durch mehrfaches Wiederholen und Nachprüfen der verschiedenen Messungen vergleichbare Resultate erzielt werden. Als Transformator diente wie schon erwähnt ein kleiner Klingelfuss'scher 10 cm-Induktor, der für alle im Folgenden beschriebenen Versuche mit einer konstanten Stromstärke von 2,8 Ampères<sup>3)</sup> bei 32 Volt Spannung gespiesen wurde. Um den Hammerunterbrecher (eine spezielle Klingelfuss'sche Konstruktion) in möglichst gleichmässigem Gange zu erhalten, wurden die Unterbrechungsfunken durch einen besondern grossen Kondensator gelöscht, der Unterbrecher selbst so reguliert, dass durchschnittlich 140 Entladungen pro Sekunde übergangen.<sup>4)</sup>

1) *H. Riegger*. Inaug.-Diss. Strassburg 1911.

2) *H. Rohmann*. Phys. Ztschr. 13, 694 (1912) und 14, 528 (1913); vgl. auch *H. Warfvinge*. Jahrb. d. drahtl. Tel. 7, 126 und 245 (1913).

3) Am Hitzdrahtinstrument gemessen.

4) Bei der kurzen Funkenstrecke gingen meist Schliessungs- und Öffnungsfunken über.

Fig. 1 deutet schematisch die Disposition an: Stosskreis I besteht aus einer Leydnerflasche von 1480 cm Kapazität und  $12\frac{1}{4}$  Windungen einer aus 4 mm dickem Kupferdraht auf Hartgummikern gewickelten Spule. Er enthält die Funkenstrecke und eine Messschleife  $K_1$ .

Der angestossene Kreis II ist auf einem längs der grossen Spule verschiebbaren Brette angeordnet, er umfasst 15 Windungen der Selbstinduktion und zwei kleine parallelgeschaltete Flaschen mit zusammen 1255 cm Kapazität. Zwei Kontaktrollen  $R_1$  und  $R_2$  legen sich an zwei Stellen an die Windungen der Hauptspule an, wodurch

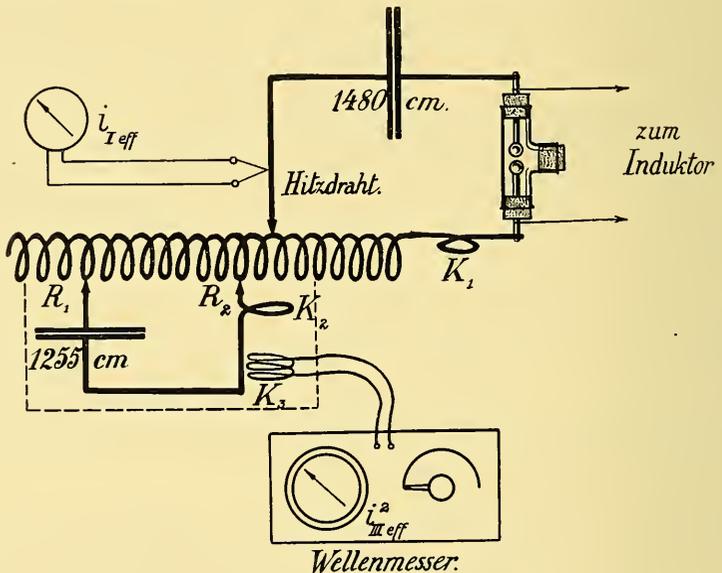


Fig 1.

man imstande ist, eine rasche Kopplungsvariation von 8 0/0 bis 83 0/0 Kopplungsgrad in 20 Stufen zu erzielen. Bei der engsten Kopplung liegen  $R_1$  und  $R_2$  natürlich über den Windungen des Kreises I bei sehr losen Kopplungen ganz ausserhalb am Ende der Hauptspule. Das logarithmische Dekrement bestimmte sich zu  $\delta = 0,025$ .

Als Messkreis diente mir ein grosser Wellenmesser nach Telefunken, dessen bewegliche Flachspule  $K_3$  entweder mit der Kopplungsschleife  $K_2$  des gestossenen oder  $K_1$  des stossenden Kreises gekoppelt werden konnte. Bei vergleichenden Messungen blieben natürlich die Abstände  $K_3-K_2$  resp.  $K_3-K_1$  konstant. Am Hitzdrahtinstrument des auf die Stosselle abgestimmten Wellenmessers lassen sich dem Stromeffekte im letzteren proportionale Skalenteile ablesen.

Alle Kopplungen, Wellenlängen, Dämpfungen u. s. w. sind mittels des Wellenmessers bestimmt.

Kreis I und Kreis II wurden zunächst mit langen Magnesiumfunken so scharf wie möglich auf dieselbe Wellenlänge,  $356\text{ m}$  ( $8,43 \times 10^5$  Schwingungen pro Sekunde), abgestimmt; infolge der Abhängigkeit der Eigenwelle eines Schwingungskreises von der Natur der Funkenstrecke<sup>5)</sup> wie auch unter dem Einfluss der mit der Kopplung etwas veränderlichen Selbstinduktionen ist die gegenseitige Abstimmung nicht ganz scharf zu nennen, was jedoch die Gesamtergebnisse nicht merklich beeinflusst.<sup>6)</sup>

Untersucht wurden die Metalle *Magnesium, Kupfer, Aluminium, Eisen* und *Zink* in Form von Kugeln von 1 cm Radius. Zunächst ist bloss eine Funkenlänge, nämlich  $f=0,12\text{ mm}$ , studiert worden, eine in der Praxis der Stosserregung ja übliche Grössenordnung. Die Funkenkugeln, an einem Funkenmikrometer befestigt, sind von einem weiten Glasrohr umschlossen, welches neben den beiden Ansätzen für Gaszu- und -abfluss einen weiten Tubulus gegenüber der Funkenübergangsstelle besitzt. Durch dieses gewöhnlich dicht verschlossene Fenster wird zum Messen der Funkenlänge ein Glimmerblatt bekannter Dicke zwischen die Kugeln eingeführt. Als typische Einbettungsgase sind *Wasserstoff, Leuchtgas, Sauerstoff* und *Luft* in die Funkenkammer geleitet und untersucht worden.

Alle auf diesem Gebiete arbeitenden Autoren heben die Schwierigkeit hervor, konstante, bei Versuchswiederholung übereinstimmende Werte zu erhalten. Bedenkt man, welchen wechselnden Einflüssen der Entladungsvorgang in der Funkenbahn unterworfen ist, so erscheinen die Abweichungen zeitlich aufeinanderfolgender Messungen untereinander verständlich. Besonders im vorliegenden Falle traten solche Schwankungen äusserst störend auf; schon die kugelförmigen Elektroden erschweren die Messung durch den Umstand, dass sich die Entladung auf einen kleinen Raum beschränken muss und dass der gemessene Elektrodenabstand nur beim Funkenübergange zwischen den sich unmittelbar gegenüberstehenden Punkten der Kugeln die Funkenlänge darstellt. Wird die Übergangsstelle mechanisch und chemisch angegriffen, so ändert sich die Länge des Funkens. Andererseits waren die Kugelelektroden insoweit von grossem Vorteil, als mit Leichtigkeit die Natur der Entladung während des Stossvorganges beobachtet werden konnte, was bei geschlossenen Platten-

<sup>5)</sup> *M. Wien.* Phys. Ztschr. 11, 282 (1910).

<sup>6)</sup> Gut bewährte sich zur Korrektur der noch bleibenden Verschiedenheiten folgende Methode: Kreis II wird mit Stossfunken bei günstigster Kopplung erregt und seine Eigenwelle genau gemessen. Auf diese Welle kann sodann Kreis I leicht scharf eingestellt werden.

funkenstrecken naturgemäss nicht möglich ist. Schliesslich ist der Krümmungsradius der Elektrode an der Funkenübergangsstelle von Einfluss auf das Funkenpotential, auch darf die „Hörnerwirkung“ der krummen Flächen namentlich auf Funkenareolen nicht ausser Acht gelassen werden.

So ergab sich von selbst folgende Untersuchungsmethode: Mit sämtlichen Elektrodenmetallen (Mg, Cu, Al, Fe und Zn) wurden in allen Gasen ( $H_2$ ,  $O_2$ , Luft und Leuchtgas) zahlreiche Messungsreihen ausgeführt, bis es möglich war, neben einer guten experimentellen Fertigkeit im raschen Durchführen einer Messung, durch Zeichnung typischer Kopplungskurven ein einwandfreies Bild des Verhaltens aller angeführten Funkenstrecken zu gewinnen. Schliesslich wurden unter strengster Beobachtung aller bei den vielen Aufnahmen als nötig erkannter Vorsichtsmassregeln mit möglichster Sorgfalt für alle verfügbaren Kombinationen Kopplungskurven aufgenommen, welche die grösste Annäherung an den wirklichen Vorgang darstellen dürften. Diese Kurven sind in den Figuren 2, 4, 5 und 6 wiedergegeben.

Die Kurven unterscheiden sich von den Resultaten anderer Autoren<sup>7)</sup> erstens durch die Verwendung kugelförmiger Elektroden und zweitens durch die Mitwirkung von Partialentladungen beim Stossvorgang. Die Ausbildung der Partialfunken, die natürlich durch die Konstruktion des Induktors mitbedingt ist, wurde absichtlich nicht verhindert, sondern zum Zwecke genauen Studiums der Entstehungsbedingungen solcher „Nachzügler“ zugelassen.

Nun ist zu überlegen, was für allgemeine Gesichtspunkte zur Beurteilung der zu erwartenden Resultate massgebend sein werden: Dabei wird es sich zunächst um den im Stosskreise entwickelten Stromeffekt handeln. Dieser ist bekanntlich dem Quadrate der Maximalstromstärke direkt, der Dämpfung verkehrt proportional. Bei konstanter Unterbrechungszahl am Induktor wird also ausserdem für den Stromeffekt im Kreise I nur noch die Frage nach der Natur der Einzelentladung (ob Aureolen, Glimmentladung, Partialfunken vorliegen) in Betracht kommen. Die Maximalstromstärke hängt direkt vom Funkenpotential ab. Ist letzteres hoch, so haben wir auch *et. par.* hohen Stromeffekt zu erwarten. Für die Stosserregung des Kreises II, die wegen der Energieübertragung bei möglichst engen Kopplungen noch möglichst rein sein soll, wird bekanntlich das Abreissen oder Löschen der Entladung in kürzester Zeit verlangt. Dies wird umso eher ermöglicht, je weniger leitende Dämpfe in der Funkenbahn vorhanden oder je schneller solche Dämpfe aus der

<sup>7)</sup> z. B. A. Schmid. Inaug.-Diss. Strassburg 1912.

Funkenbahn entfernt werden. Eine sehr eingehende Studie über die Löschwirkung bei den verschiedensten Metallen, Einbettungsgasen und -dämpfen ist von *E. Taege*<sup>8)</sup> veröffentlicht worden, bei welcher die Stosserregung an zwei äusserst eng gekoppelten gegeneinander verstimmten Kreisen untersucht wird, und neben allgemeinen Gesichtspunkten Reihen der Metalle und Gase nach der Güte der erzielbaren Stosserregung geordnet angegeben werden. Diese Reihenfolge stimmen im Grossen und Ganzen mit dem durch zahlreiche frühere Untersuchungen verschiedener Autoren gefundenen überein. Kupfer und Silber sind in der Technik längst als gute, Zink und Magnesium als schlechte Stosserreger bekannt. Es wird im Folgenden zu zeigen sein, inwieweit dies bei Berücksichtigung von Partialfunken zutrifft, und zwar sollen in vier Abschnitten die Gase: Luft, Wasserstoff, Sauerstoff und Leuchtgas einzeln behandelt werden.

### 1. Luft.

Der Sauerstoff der Luft wird bei den relativ hohen Funken-temperaturen die Elektroden sofort angreifen, es sind in den ersten Momenten des Funkenüberganges zwischen den frisch gereinigten Kugeln naturgemäss andere Messungswerte zu erwarten wie später. So wurde, wie dies auch *Riegger* in seiner Arbeit hervorhebt, eine starke Veränderung der Kopplungskurven mit zunehmender Oxydation in der Funkenstrecke beobachtet, die zunächst von einer Abnahme des Stromeffektes im Kreise I und dann von einer Verkürzung der Funkenstrecke durch die wachsenden Oxydschichten herrührt. Besonders bei Eisen und Zink, zuweilen auch bei Kupfer verlangte bei der kurzen Funkenlänge von 0,12 mm eine direkte Brückenbildung zwischen den Funkenkugeln ein häufiges und recht mühsames Wiederholen der Versuche. Um den Einfluss, welchen die Veränderung der Elektroden auf die Kopplungskurven ausübt, beurteilen zu können, wurden Versuchsserien mit Aluminiumkugeln in Luft gemacht. Die durch mehrfaches Wiederholen gewonnenen Kurven zeigen eine Abnahme der Intensität in der Stosswelle, verbunden mit einer Verschiebung der günstigsten Kopplung zu höhern Werten des Kopplungsgrades. Beide Erscheinungen erklären sich zwanglos aus der durch Einwirkung der Luft auf das Aluminium (Bildung von Aluminiumnitrid?) sich ergebenden Verkürzung der Funkenstrecke. Es fällt dabei das Funkenpotential, mit ihm auch der Stromeffekt im stossenden Kreise, gleichzeitig steigt aber, wie weiter unten noch näher betrachtet, die Funkendämpfung; es ist also noch bei engern Kopp-

<sup>8)</sup> *E. Taege*. Diss. Göttingen 1914. (Ref. Phys. Zschr. 14, 1041, 1913).

lungen gute Stosserregung erzielbar. Nach längerem Betrieb der Funkenstrecke liess sich übrigens das Messglimmerblatt nicht mehr einschieben.

Umgekehrt sind die Verhältnisse z. B. bei Magnesium, wo durch Oxydation und damit verbundener starker Abplattung der Funkenkugeln die Länge der Funkenstrecke rasch wächst. Diese Umstände verlangten jeweils eine möglichst beschleunigte Durchführung der Versuche.

a) *Magnesium*. In Luft ist Magnesium als typisch schlechter Stosserreger bekannt.<sup>9)</sup> Die Funken, es gehen Öffnungs- und Schlies-

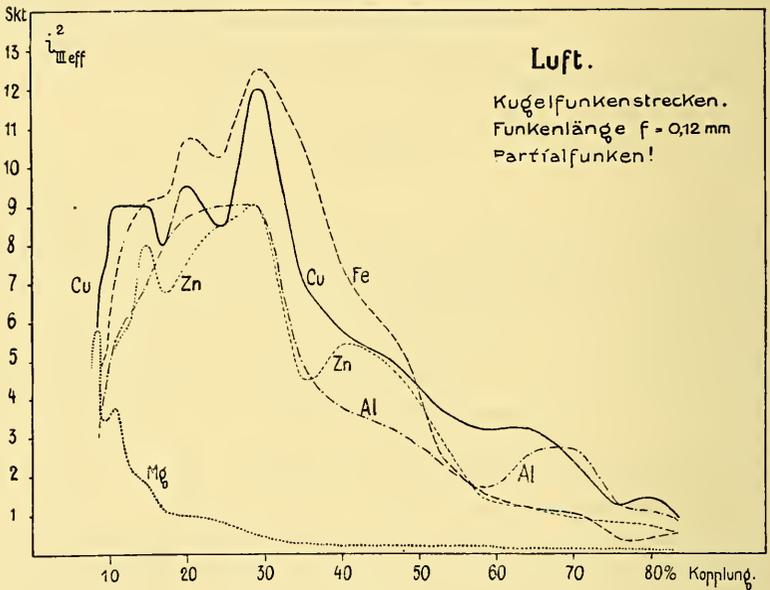


Fig. 2.

sungsfunken über, sind intensiv grün, enthalten viel verbrennenden Metall Dampf und erfüllen den Funkenraum mit glühenden feinen Magnesiumoxydteilchen. Im rotierenden Spiegel betrachtet, zeigen sie zahlreiche blaue breite Partialentladungen, die mit breitem grünem Leuchten (Nachglühen?) abwechseln; zuweilen blitzt das gelbe Glühen der festen Oxydteilchen auf. Das Funkenpotential für Einzelfunken ergab sich aus einer rohen Messung zu etwa 800 Volt. Dieser Wert sinkt bei der raschen Aufeinanderfolge der Entladungen stark, da die späteren Funken schon eine ionisierte Luftstrecke vorfinden. Die grosse Zahl von breiten Partialfunken hauptsächlich und das ver-

<sup>9)</sup> Vgl. etwa A. Schmid, loc. cit. p. 24.

hältnissmässig hohe Funkenpotential lassen einen im Vergleich zur aufgewandten Primärenergie ziemlich grossen Stromeffekt im Stosskreise I erwarten. Die schlechte Stosserregung durch Magnesiumfunken bewirkt aber eine Verteilung des Effektes im Kreise I auf die Kopplungswellen in I und II zu Ungunsten der Eigenwelle des Kreises II, sodass nur bei etwa 10 % Kopplungsgrad von reiner Wienscher Erregung gesprochen werden kann (Fig. 2).

b) *Kupfer*. Hier gehen die Öffnungsfunken viel leichter über als die Schliessungsfunken. Funke grün unruhig, oxydiert die Elektroden rasch, wobei (im Gegensatz zu Kupfer in Sauerstoff) ein verwaschener schwarzer Oxydfleck entsteht und sich leicht Brücken bilden. Im rotierenden Spiegel fällt das unregelmässige Abwechseln zwischen wenigen breiten und zahlreichen feinen Partialfunken auf, bei Kopplung mit Kreis II und Stosserregung werden die Partialfunken äusserst fein und zahlreich. Ausserdem ist noch eine violette, vom Stickstoff der Luft herrührende Glimmentladung wahrnehmbar. Das an Einzelfunken gemessene Funkenpotential in Luft betrug etwa 700 Volt. Die bei den einzelnen Messungen erhaltenen Kurven sind, ähnlich wie die Riegger'schen, bei losen Kopplungen sehr zerklüftet; besonders in die Augen springend sind drei mehrfach wiederkehrende Maxima.<sup>10)</sup> Bei höhern Kopplungen schlechter Stoss und flacher Verlauf der Kurve.

c) *Aluminium* zeigt, wie schon oben angedeutet, ein eigenartiges Verhalten, was sich bereits am Aussehen der Funken zu erkennen gibt. Öffnungs- und Schliessungsentladung gehen als feine höchst unruhig die Ansatzstelle wechselnde perlende weisse Funkenserien über. Der rotierende Spiegel zeigt keine Aureolen, aber dafür sehr zahlreiche feine Partialfünkehen. Die Dämpfung im Kreise I ist bei Aluminium auffallend gross. Die Funken lassen einen unter der Feile harten strahligen Fleck auf den Elektroden zurück (Aluminiumnitrid?). Gerade im Gegensatz zu Kupfer weisen bei losen Kopplungen die Kurven von Aluminium wenig scharfe Maxima und Minima auf, dagegen macht sich ein Teilmaximum bei 68 % bei fast allen Aufnahmen stark geltend. Das günstige Verhalten des Aluminiums bezüglich der Stosserregung veranlasste mich, einen Versuch mit einer mikrometrisch regulierbaren Aluminiumplattenfunkenstrecke anzustellen.

Zwei je 1 cm dicke, sorgfältig eben geschliffene runde Aluminiumplatten von 4 cm Durchmesser stehen sich genau parallel

<sup>10)</sup> Zweifellos sind viel mehr Maxima und Minima vorhanden, wie die Versuche von Schmid zeigen. Bei meiner nur stufenweise veränderlichen Kopplungsvorrichtung können jedoch lange nicht alle herauskommen.

gegenüber, einen mikrometrisch veränderlichen dünnen Luftraum zwischen sich lassend.<sup>11)</sup> Bei passender, nicht zu grosser Energie erhält man die oben beschriebenen ausserordentlich unruhig zwischen den Platten perlenden mageren Fünkehen, mit welchen eine gute Stosserregung zu erzielen ist. Den eigenartigen Zusammenhang zwischen günstigster Kopplung und Funkenlänge veranschaulicht Fig. 3. Man erkennt wiederum die bei Platten im Gegensatz zu Kugeln ausgeprägten typischen Kopplungsmaxima bei 15 0/0, 20 0/0 und 29 0/0 Kopplungsgrad, und zwar nimmt jedes dieser Maxima einmal die Stelle des günstigsten Kopplungsgrades ein. Bei 0,1 mm

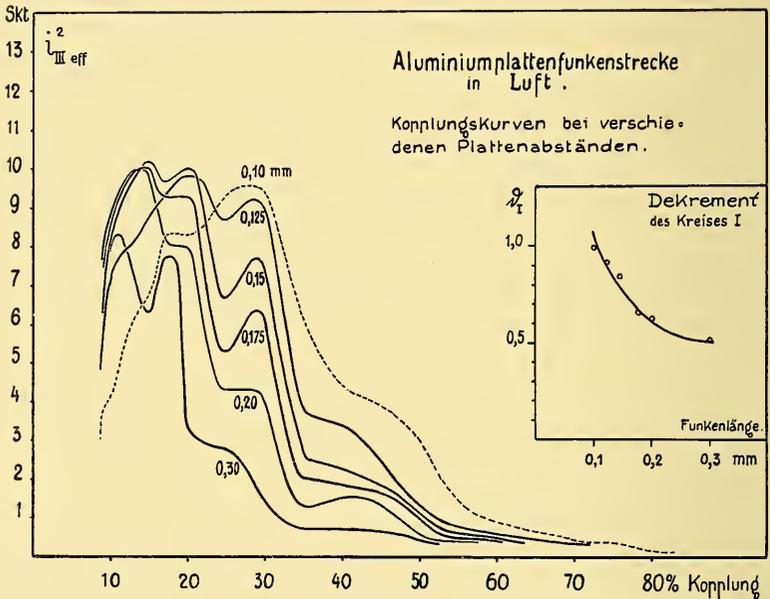


Fig. 3.

Funkenlänge ist es das Teilmaximum bei 29 0/0, bei 0,125 mm wie auch bei unserer typischen Kopplungskurve dasjenige von 20 0/0, während bei allen grösseren Funkenlängen bis 0,2 mm das erste Maximum bei 15 0/0 seinen Platz behauptet. Dass kleine Verschiebungen dabei denkbar sind, soll hier noch erwähnt werden, sie sind aber bei unserer experimentellen Anordnung nicht erkennbar und können nur mittels einer induktiven, kontinuierlich variablen Kopplungsvorrichtung nachgewiesen werden. Dass der kurze Aluminiumfunke übrigens keinen exponentiellen Amplitudenabfall im Schwingungskreise

<sup>11)</sup> Die Funkenstrecke wird von der Firma Fr. Klingelfuss in Basel hergestellt.

liefert, zeigten mit verschiedenen Funkenlängen aufgenommene Resonanzkurven, die mit abnehmender Funkenlänge steigende Asymmetrie aufwiesen. Eine Dekrementbestimmung aus solchen Resonanzkurven kann daher nur für orientierende Messungen genügen. Die erhaltenen Werte der Dekremente des Kreises I sind in Fig. 3 ebenfalls aufgetragen.<sup>12)</sup>

Es sei nebenbei noch beigefügt, dass bei Kugeln die „Oxyd“-schicht oft ein vollständiges Zusammenschieben der Aluminiumkugeln ohne Kontakt erlaubt. Bei so kurzen Funkenstrecken lässt sich dann noch bei ausserordentlich hohen Kopplungsgraden (über 60 %) recht reine Stosserregung erzielen.

d) *Eisen*. Öffnungs- und Schliessungsstrom gehen über. Die Zahl der Partialentladungen ist anfangs gering, auch lässt sich eine violette Aureole nachweisen, in der zuweilen eine gelbe Glut von glimmenden Oxydteilchen herrührend aufleuchtet. Nach längerem Betrieb stellen sich zahlreiche feine Partialfünken ein. Die Oxydation der Elektroden begünstigt die Bildung der magern, rasch abreisenden Partialfünken. Wechselt die zahlreichen feinen Funken jedoch mit breiteren, in geringerer Anzahl auftretenden „Aureolen“-funken ab, so schwankt die Erscheinung zwischen reiner und unreiner Stosserregung hin und her, die Messung wird unsicher und unbrauchbar, wenn man nicht zwei getrennte Stadien unterscheiden will, denen zwei Kopplungskurven entsprechen.

e) *Zink*. Das Verhalten des Zinkfunkens in Luft ähnelt in vielen Punkten demjenigen des Eisens. Hier wie dort lassen sich zwei rasch miteinander abwechselnde Zustände feiner (gute Stosswirkung liefernder) und grober (weniger zahlreich auftretender, schlecht wirkender) Partialentladungen unterscheiden. Da der letztere Zustand beim leicht verdampfenden Zink der überwiegende ist, so erklärt sich das eine Stossmaximum der typischen Kopplungskurve von Zink bei recht loser Kopplung ungezwungen. Nur bei dieser verhältnismässig langen Schwebungsdauer reissen eben die viel Metaldampf führenden Zinkfunken schnell genug ab, um den Stosskreis rechtzeitig zu öffnen. Die besonders beim Zink ausserordentlich lästige Brückenbildung zwischen den Elektroden erschwert die Messungen sehr.

Zusammenfassend lässt sich an Hand von Fig. 2 folgendes aussagen: In Luft verhalten sich kurze Kugelfunkenstrecken aus Aluminium, Eisen, Kupfer und Zink ähnlich bezüglich ihrer Stosswirkung. Die günstigsten Kopplungen, welche gute Wien'sche Erregung liefern, umfassen hier das Gebiet von 20 % bis 30 % Kopplungs-

<sup>12)</sup> Ein Vergleich mit dem in Tabelle I für Aluminiumkugeln gegebenen Dekremente zeigt, dass obige Werte wohl etwas zu hoch sein dürften.

grad. Abweichend verhalten sich Magnesiumkugeln; hier ist die Grösse des auf die Stossstelle fallenden Energieanteils eine viel geringere wie bei den übrigen untersuchten Metallen. Während mit Kupfer, Aluminium, Eisen und Zink noch bei verhältnismässig engen Kopplungen (oberhalb 30 %) eine wenn auch unreine Stosswirkung erzielbar ist, gelingt dieser Effekt bei Magnesium nur innerhalb eines beschränkten Gebietes loser Kopplungen.

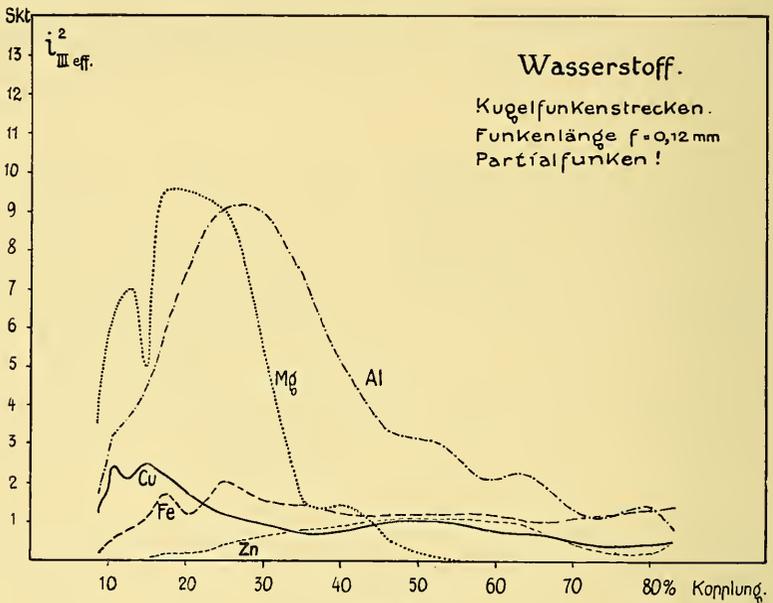


Fig. 4.

## 2. Wasserstoff.

Dass Wasserstoff die Eigenschaften eines Funkens in hohem Grade beeinflusst, ist schon frühe erkannt worden. *K. E. F. Schmidt*<sup>13)</sup> versuchte bereits 1907 mit Funken in Wasserstoff am Braun'schen Sender zu arbeiten. Er bemerkte, wie in diesem Falle die „Wirkung“ der Funken ab-, die Dämpfung der sie enthaltenden Schwingungskreise zunahm. Ein Schüler Schmidts, *C. Richter*,<sup>14)</sup> hat dann genauere Dämpfungsmessungen an Wasserstoff-Funkenstrecken angestellt zu einer Zeit, in welcher die Stosserregung und die Wichtigkeit der Funkendämpfung für das Zustandekommen dieser Erscheinung eben entdeckt worden war. So konnte *Glatzel*<sup>15)</sup> seine bemerkens-

<sup>13)</sup> *K. E. F. Schmidt*. Phys. Ztschr. 8, 617 (1907).

<sup>14)</sup> *C. Richter*. Phys. Ztschr. 10, 703 (1909).

<sup>15)</sup> *Br. Glatzel*. Phys. Ztschr. 11, 886, 890, 894 (1910).

werten Untersuchungen über Stosswirkung bestimmter Wasserstoff-Funkenstrecken bei hohen Kopplungsgraden ausführen. In welchem Masse Wasserstoff die Löschwirkung begünstigt, ist heute durch viele seither ausgeführte Untersuchungen zur Genüge bekannt. Es ist deswegen interessant, die Veränderung in den Kopplungskurven zu beobachten, welche durch Wasserstoff anstelle der Luft in unserm Falle herbeigeführt wird.

a) *Magnesium*. Während unter den oben erläuterten Bedingungen Magnesium sich in Luft als schlechter Stosserreger erwies, ist bei Wasserstoff als Einbettungsgas gerade das Umgekehrte der Fall. Es liess sich mit den oben erwähnten Magnesiumkugeln bei 0,12 mm Elektrodenabstand in Wasserstoff eine recht kräftige Stosswirkung erzielen und zwar bei Kopplungen zwischen 17 % und 25 %. Dabei war der Funke intensiv grün. Schliessungs- und Öffnungsentladung gingen über. Der stetig zwischen den Kugeln übergehende Funkenstrom löste sich im rotierenden Spiegel in zahlreiche leuchtende Partialentladungen auf.

b) *Kupfer*. Auffallenderweise liefert Kupfer, und wie gleich erwähnt werden soll, mit ihm Eisen und Zink nur niedrige Kopplungskurven, die namentlich beim letztern Metalle ganz flach verläuft. Die Natur der Entladung gibt darüber Aufschluss: Zwischen den Kupferkugeln bildet sich eine schwach leuchtende bläulich rosa gefärbte Glimmentladung aus, die von einzelnen weissen, unregelmässig auftretenden Partialfunken durchsetzt ist. Meist geht nur der Öffnungs-, nur zuweilen auch der Schliessungsstrom über. In Anbetracht des glimmlichtartigen Charakters der Entladung gemeinsam mit dem in Wasserstoff niedrigen Funkenpotential ist also eine Herabsetzung des Stromeffektes im Stosskreis und damit eine ungünstige Beeinflussung der Stosswirkung nicht verwunderlich.

c) *Aluminium*. Die Funkenentladung zwischen Aluminiumkugeln in Wasserstoff ist charakterisiert durch ihre purpurrote Farbe. Während bei Magnesium sich das Spektrum des Elektrodenmaterials (grüne Magnesiumlinien!) geltend macht, tritt hier das Wasserstoffspektrum stark hervor. Öffnungs- und Schliessungsentladung gehen in Form zahlreicher feinsten Partialfünkechen über. Eine Glimmlichtbildung war nicht zu beobachten. Diese Bedingungen deuten auf gute Stosswirkung hin, und zwar besitzt, wie Fig. 4 zeigt, die typische Kopplungskurve ein hohes Maximum bei 28 % Kopplungsgrad und überlässt auch bei noch engeren Kopplungen der Stosswelle einen beträchtlichen Energieanteil.

d) *Eisen*. Wie schon erwähnt, ähnelt Eisen in seinem Verhalten dem Kupfer. Wie dort, so auch hier erschwerter Übergang beim

Schliessungsströme, Glimmlichtbildung und vereinzelte Partialfunken. Nur ist auch hier wieder das eigentümliche Verhalten des Eisens zu beobachten, zu zwei getrennten Entladungsstadien hinzuneigen. Die schwachen Stromeffekt liefernden seltenen Partialfunken werden zuweilen durch Ketten zahlreicher feiner Einzelentladungen abgelöst, wobei dann der Stromeffekt im Stosskreise steigt und die Stosswirkung momentan eine erhöhte Energieaufnahme im angestossenen Kreise bewirkt. Der gewöhnlich zu beobachtende Verlauf der Kopplungskurve ist jedoch der in Fig. 4 dargestellte flache. Er entspricht dem unter den von uns gewählten Bedingungen stabileren Stadium der seltenen Partialfunken.

e) *Zink*. Zink liefert in Wasserstoff den niedrigsten Stromeffekt, obgleich Öffnungs- und Schliessungsfunke übergehen. Die Glimmlichtbildung ist stark ausgeprägt, die einzelnen Partialfunken, welche das Glimmlicht durchsetzen, vermögen nur wenig zur Stosswirkung beizutragen.

Zusammenfassend ist hier der Gegensatz zwischen der Gruppe Kupfer, Eisen und Zink und den Elektrodenmaterialien Aluminium und Magnesium hervorzuheben. Während bei der Gruppe der drei schweren Metalle die Entladung Glimmlichtcharakter annimmt, ist dies bei den Metallen Aluminium und Magnesium nicht der Fall. Letztere entwickeln zahlreiche stosserregende Partialfunken und vermögen so einen grossen Anteil der verfügbaren Energie in die Eigenwelle des anzustossenden Kreises zu drängen.

### 3. Sauerstoff.

Bekanntlich sind die Funkenpotentiale in Sauerstoff wesentlich höher als in Wasserstoff, auch fällt das unruhige Wandern der Funkenansatzstelle auf. Die Messungen sind sehr durch die starke Oxydation der Elektrodenmaterialien und die damit verbundene Brückenbildung erschwert. Im allgemeinen ist die Entladung hell leuchtend, die Bildung von Partialfunken begünstigt.

a) *Magnesium*. Eine leuchtend weisslich grüne, unruhig die Ansatzwelle wechselnde Entladung, welche die Funkenkugeln in kurzer Zeit durch Oxydation abplattet, liefert nur bei sehr losen Kopplungen Stosserregung. Obgleich die Stromstärke im Kreise I bei Sauerstoff grösser ist wie bei Wasserstoff, wird doch nur ein geringer Teil der verfügbaren Energie in die Eigenwelle des anzustossenden Kreises gesteuert. Magnesium in Sauerstoff wirkt mit grosser Annäherung wie Magnesium in Luft, wie ein Vergleich der Figuren 2 und 5 lehrt. Im rotierenden Spiegel fällt ein Unterschied zwischen

feinen grünen und breiten blauen Partialfunken auf. Das gelbe Nachglühen, was *Taege*<sup>16)</sup> beschreibt, wurde ebenfalls beobachtet.

b) *Kupfer*. Kupfer liefert in Sauerstoff zerklüftete Kurven mit guter Stosserregung in einem ziemlich scharf begrenzten Gebiete loser Kopplungen (hier 10—25 0/0). Schliessungs- und Öffnungsfunke gehen über. Die grünweisse, unruhige Entladung wird durch glänzende Ketten feiner Partialfunken gebildet. Oxydbrücken erschweren auch hier die Messung durch Verringerung der Funkenlänge, die bis zum Kurzschluss führen kann.

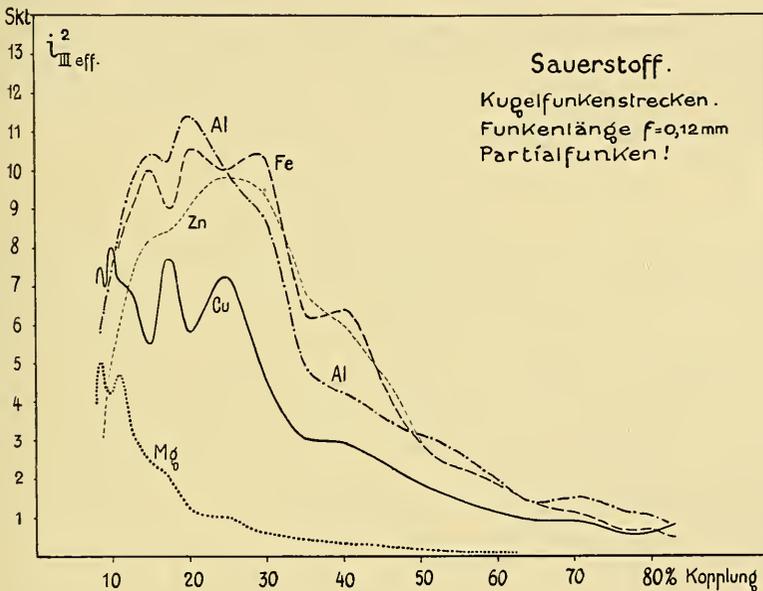


Fig. 5.

c) *Aluminium*. Gegenüber dem Verhalten in Luft erhöhter Stromeffekt in der Stosswelle bei loserer Kopplung. Öffnungs- und Schliessungsfunke gehen über. Wie in allen untersuchten Gasen fällt auch hier wieder die Neigung zur Bildung zahlreicher feiner Partialentladungen auf; infolgedessen ist auch die Stosserregung eine verhältnismässig vorteilhafte. Günstigste Kopplung bei der gewählten Funkenlänge von 0,12 mm etwa bei 20 0/0. Der weisse Funke wechselt unruhig seine Ansatzstelle.

d) *Eisen*. Der zwischen zwei Stadien wechselnde Charakter der Entladung lässt auch hier zwei Kopplungskurven erwarten, die eine dem für die Stosserregung ungünstigen Zustände mit seltenen

<sup>16)</sup> *E. Taege*, loc. cit.

breiten, die andere der aus vielen feinen Partialfunken bestehenden Entladungsform entsprechend. Obwohl es mir glückte, Bruchstücke der einen wie der andern Kurve getrennt aufzunehmen, gelangt hier nur die der guten Stosswirkung entsprechende zur Darstellung. Es wird eben einem einzelnen Beobachter wohl schwer möglich sein, die beiden Entladungsstadien, die auch bei andern Elektrodenmaterialien und Gasen<sup>17)</sup> existieren, getrennt durch Messung zu charakterisieren.

e) *Zink*. Die weisse unruhige Entladung, bei beiden Phasen des Unterbrechungsvorganges am Induktor übergehend, erweist sich im rotierenden Spiegel als unregelmässiger Wechsel breiter und feiner Partialfunken. Das Vorhandensein der breiten Partialfunken ist äusserlich an zuweilen auftretenden Aureolen erkennbar. Stosserregung bei loser Kopplung ähnlich wie in Luft.

#### 4. Leuchtgas.

Kohlenwasserstoffe und Gemische von Gasen, die in der Hauptsache Kohlenwasserstoffe enthalten, begünstigen die Stosserregung sehr. Bei allen von mir untersuchten Elektrodenmaterialien war die günstigste Kopplung eng (35 0/0 bis über 45 0/0), wenn Leuchtgas den Funkenraum erfüllte. Eine etwas auffallende Beobachtung soll gleich vorweg genommen werden. Infolge der Zersetzung des Leuchtgases unter Einwirkung der Funkenentladung erfüllt sich der Raum zwischen den Elektroden mit ausgeschiedenem Kohlenstoffe. Die Ähnlichkeit der typischen Kopplungskurven bei den verschiedenen Elektrodenmaterialien könnte dazu verleiten, eine begünstigende Wirkung des Kohlenstoffes anzunehmen. Die Russchicht bildet sich, wenn auch sehr verschieden stark, bei allen Funkenstrecken in Leuchtgas aus, die Ähnlichkeit im Verlaufe der Kopplungskurven, wie sie Fig. 6 zeigt, würde also durch den ausgeschiedenen Kohlenstoff bedingt. Dass diese Vermutung nicht richtig sein kann, beweisen die an Kohlefunkenstrecken aufgenommenen Kopplungskurven von *Schmid*,<sup>18)</sup> welche Kohle wie Magnesium als schlechte Stosserreger kennzeichnen. So scheint es unwahrscheinlich, dass hier gerade das Gegenteil der Fall sein sollte. Ein Kontrollversuch zeigt die Richtigkeit der Vermutung.

Wenn der Kohleniederschlag einen merklichen Einfluss auf die Entladung ausübte, so müsste dieser Einfluss beim Wechsel der Gasart unter Beibehaltung der einmal gebildeten Russchicht solange

<sup>17)</sup> Man vergleiche das bei Cu, Fe und Zn in Luft, bei Fe in H<sub>2</sub>, bei Mg und Zn in O<sub>2</sub> gesagte.

<sup>18)</sup> A. Schmid, loc. cit. p. 18 und 24.

nachwirken, als noch Kohle in der Funkenstrecke vorhanden ist. Ein Versuch mit in Leuchtgas berussten Eisenkugeln, der bis zur Brückenbildung ausgedehnt wurde, lehrte, dass sich beim Einleiten von Wasserstoff *sofort* der auf pag. 156 beschriebene Entladungszustand mit niedrigem Stromeffekt und geringer Energie im Stosskreise ausbildete, der Kohleniederschlag also die für Wasserstoff typischen Erscheinungen nicht beeinflusst hatte.

Das Aussehen der Entladung ist weisslich mit grünen Nuancen, meist behalten die Funken eine anfangs gewählte Übergangsstelle stabil bei.

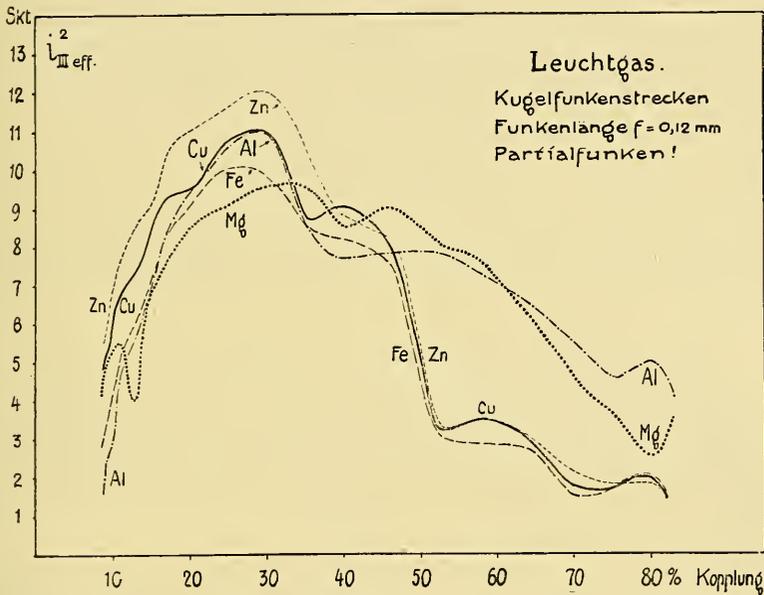


Fig. 6.

a) *Magnesium*. Öffnungs- und Schliessungsfunken gehen in Form zahlreicher, bei gutem Stoss äusserst fein werdender grüner Partialentladungen über. Die für Magnesium charakteristische gelbe Glut ist leicht zu beobachten. Man erhält unschwer gute Stosserregung mit einem Kopplungsoptimum bei etwa 35%. Die geringe Russabscheidung fällt auf.

b) *Kupfer*. Kupfer entwickelt zu Beginn des Versuchs, also bei frisch abgeschmirgelten Kugeln, bei hohem Stromeffekt zahlreiche breite Partialfunken, die bei günstigen Kopplungen in feinere Stossfunken übergehen. Die Erscheinung bleibt verhältnismässig stabil und ist nicht so sehr wie etwa Eisen durch Russabscheidung benachteiligt.

c) *Aluminium*. Die grünlich weisse, stabile Entladung, welche bei Öffnung und Schliessung des Primärstromes entsteht, erweist sich im rotierenden Spiegel als aus feinsten Partialfünkchen bestehend, ein Umstand, der wohl die breit verlaufende, zwischen 20 0/0 und 30 0/0 ihre höchste Erhebung aufweisende Kopplungskurve bedingt. Ein starkes Angreifen der Elektroden durch die Entladung wurde immer beobachtet, dagegen ist ähnlich wie bei Magnesium die Russabscheidung gering.

d) *Eisen*. Im Gegensatz zu der entsprechenden Erscheinung bei Kupfer scheidet sich an Eisen in Leuchtgas mehr Kohle ab. Zu Beginn des Versuchs, wo die Eisenkugeln noch blank geschmiregelt sind, beobachtet man einen starken Effektivstrom, der von mässig vielen breiten Partialentladungen getragen wird. Nach kurzer Zeit sind die weisslichen Funken mager und fein geworden, der Stromeffekt ist gesunken, schliesslich entstehen Russbrücken und verhindern jede genaue Messung. Die typische Kurve steigt bis zum günstigsten Kopplungsgrade oberhalb 25 0/0 an, um dann gemeinsam mit den Kurven von Zink und Kupfer wieder zu fallen. Das Energiemaximum in der Eigenwelle des angestossenen Kreises erreicht aber, wie genaue Kontrollversuche zeigten, nie die Grösse des entsprechenden Energiemaximums bei Kupfer.

e) *Zink*. Hellblaue leuchtende, wenig zahlreiche Teilentladungen bei ungekoppeltem Schwingungskreise, viele feinste Partialfünkchen bei Stosserregung des angekoppelten Kreises charakterisieren die kurzen Zinkfunken in Leuchtgas. Die durch starke Kohleabscheidung sehr erschwerten Messungen zeigen, dass hier eine sehr gute Stosserregung mit grosser Energie in der Stossstelle bei ca. 30 0/0 Kopplungsgrad erreichbar ist.

Figur 6 zeigt deutlich, dass sich in Leuchtgas die Metalle Kupfer, Eisen und Zink sehr ähnlich verhalten. Wie in Wasserstoff bilden Aluminium und Magnesium eine Gruppe für sich, welche durch verhältnissmässig gute Stosserregung noch bei engen Kopplungen charakterisiert ist. Vermutlich hängt dies mit dem hohen Wasserstoffgehalt des Leuchtgases zusammen.<sup>19)</sup> Wir kommen im zweiten Teile auf diese Ergebnisse zurück.

## II. Diskussion der Ergebnisse.

Entlädt sich ein Kondensatorkreis, welcher die Kapazität  $C$  enthält, die Frequenz  $n$ , den Widerstand  $w$  und das logarithmische Dekrement  $\delta$  besitzt, in einer Einzelentladung deren Maximum-

<sup>19)</sup> Nach gütiger Mitteilung der Direktion des Basler Gaswerks enthält das verwendete Leuchtgas nahezu 50 0/0 ungebundenen Wasserstoff.

potential  $V_0$  beträgt, so ist die Energie, welche bei diesem oscillatorischen Vorgang entwickelt wird, gegeben durch den Ausdruck:

$$E = \frac{\pi^2 n w C^2 V_0^2}{\delta \left[ 1 + \left( \frac{\delta}{2\pi} \right)^2 \right]}$$

oder mit grosser Annäherung, da der Klammerausdruck im Nenner wenig von der Einheit verschieden

$$E \approx \frac{\pi^2 n w C^2 V_0^2}{\delta}$$

Erfolgen in 1 Sekunde  $p$ -Entladungen, deren zeitlicher Abstand im Vergleiche zu der kurzen Dauer des Schwingungsvorganges auch bei hohen Unterbrechungszahlen gross ist, so erhält man die Energie pro Sekunde aus

$$E_{\text{Sek.}} \approx p \cdot \frac{\pi^2 n w C^2 V_0^2}{\delta}$$

Multipliziert man die pro Sekunde entwickelte Energie mit dem kalorischen Äquivalent  $A$ , so erhält man die pro Sekunde im Kreise entwickelte Wärmemenge.

$$W_{\text{Sek.}} \approx p \cdot A \cdot \frac{\pi^2 n w C^2 V_0^2}{\delta}$$

Bildet nun ein mit Gleichstrom  $i_{\text{gl}}$  geeichtes Hitzdrahtinstrument vom Widerstande  $w'$  einen Teil des Gesamtwiderstandes  $w$  im Schwingungskreise, so kann man schreiben

$$W_{\text{Sek.}} \approx p \cdot A \cdot \frac{\pi^2 n w C^2 V_0^2}{\delta} = w' i_{\text{gl.}}^2$$

Mit grosser Annäherung ist also

$$i_{\text{gl.}}^2 = \frac{p \cdot A \cdot \pi^2 n w C^2 V_0^2}{w' \delta} = \text{Konst. } p \frac{V_0^2}{\delta}$$

wobei also folgende Bestimmungsstücke des Schwingungskreises als konstant angenommen werden: Frequenz  $n$ , Widerstand des ganzen Kreises  $w$  und Widerstand des Hitzdrahtes  $w'$ .

Vergleicht man unter sonst gleichen Umständen verschiedene Funkenstrecken gleicher Funkenlänge, aber aus verschiedenen Elektrodenmaterialien bestehend, am selben Schwingungskreise, so können die am Hitzdrahtinstrumente abgelesenen Effektiv-Stromstärken zum Vergleiche von Dekrement und Anfangspotential folgendermassen verwendet werden:

$$\begin{aligned} \text{Für die Funkenstrecke 1} \quad i_1^2 &= K \cdot p \cdot \frac{V_1^2}{d_1} \\ \text{„ „ „ 2} \quad i_2^2 &= K \cdot p \cdot \frac{V_2^2}{d_2} \quad \text{Hieraus} \\ \frac{i_2^2}{i_1^2} &= \frac{V_2^2 d_1}{V_1^2 d_2} \end{aligned}$$

Dies gilt streng genommen nur für den Fall, dass die Entladungszahl pro Sekunde in beiden Fällen die gleiche ist, in unserm Falle etwa, wenn beide Male bei Schliessung und Öffnung des Primärstromes am Induktor je eine Entladung über geht.

Komplizierter liegen die Verhältnisse im Falle von Partialentladungen. Hier handelt es sich um einen zusammengesetzten Schwingungsvorgang, der sich am leichtesten aus Fig. 7 verstehen lässt.

Jeder Öffnung bzw. Schliessung des Primärkreises entspricht eine bestimmte Zahl von Partialentladungen, Funken, die in grösserer

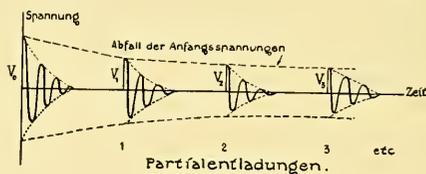


Fig. 7.

oder geringerer Anzahl in regelmässigen oder unregelmässigen Abständen als Nachzügler der Hauptentladung auftreten. *Rohmann*<sup>20)</sup> hat in einer Untersuchung auf die Wichtigkeit der Partialfunken für die Stosserregung hingewiesen, seine Ergebnisse sollen hier erweitert werden. Aus der Rohmann'schen Arbeit ergibt sich, dass, wenn der Entladungsvorgang sich derart abspielt, dass die Partialfunken wenig Metaldampf führen (also, wie man sich in der radiotelegraphischen Praxis auszudrücken pflegt, „mager“ sind), eine Begünstigung der Stosswirkung auftreten muss. Die Löschwirkung ist dann eben grösser.

Gute Stosserregung ist somit in allen den Fällen zu erwarten, bei denen feine Partialfunken zu beobachten sind. Von ihrer Zahl aber hängt es ab, ob dabei der Stromeffekt ein hoher oder niedriger ist. Schliesslich wird Regelmässigkeit im Auftreten der Partialentladungen eine wichtige Bedingung für die Konstanz der Stosswirkung sein. Dieser letztere Umstand macht die Messungen gerade besonders

<sup>20)</sup> *Rohmann*. Phys. Ztschr. 12, p. 649 (1911).

schwierig. Gelingt es nämlich nicht, bei Wiederholung ein und desselben Versuches dieselben Entstehungsbedingungen für stosserregende Partialfunken einzuhalten, dann wird es unmöglich sein, vergleichbare Resultate zu erhalten. Dies ist auch der Grund, weshalb aus den Kopplungskurven nur sehr vorsichtig Schlüsse zu ziehen sind.

In Fig. 7 ist versucht, den Spannungsverlauf mit der Zeit bei Annahme von  $n$  aufeinanderfolgenden Partialentladungen darzustellen. Die in verhältnismässig kurzen Zeitabständen auftretenden Nachzügler finden eine bis zu einem gewissen Wert ansteigende Ionisation der Funkenbahn vor. Infolgedessen ist mit Sicherheit anzunehmen, dass die Anfangspotentiale der Einzelentladungen mit wachsender Zeit nach einem bestimmten Gesetze abnehmen müssen. Es existiert also gleichsam ein Dekrement der Anfangspotentiale. Die Entladung wird schliesslich abbrechen, wenn der Transformator nicht mehr imstande ist, genügend Energie zur Überwindung des letzten Funkenpotentials nachzuliefern. Nimmt man an, dass das Dekrement der einzelnen Partialentladungen immer das selbe bleibe,<sup>21)</sup> so lässt sich die Effektiv-Stromstärke in einem Kreise bei regelmässig aufeinander folgenden Partialfunken durch eine Reihenentwicklung darstellen:

$$i_{\text{gl.}}^2 = \frac{K \cdot p}{b} \left[ V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2 \right]$$

wobei das Gesetz, nach dem die Werte  $V_n$  abnehmen, als bekannt vorausgesetzt wird. Solche Gesetze sind allerdings bis jetzt noch nicht näher untersucht worden.

Dass die Verhältnisse in Wirklichkeit aber noch verwickelter sind, zeigen die Entladungsbilder bei verschiedenen Substanzen im rotierenden Spiegel. Oben wurde erwähnt, dass Aluminium in allen untersuchten Gasen die Bildung feiner Partialfünkchen begünstigt. In Fig. 8 ist durch Zeichnung nach dem Bilde im rotierenden Spiegel (Photographie wegen Lichtschwäche der Erscheinung nicht möglich) die Bildung der Partialentladungen unter denselben Umständen die für die Aufnahme der Kopplungskurven gewählt worden waren, für Aluminium in Luft dargestellt (Funkenlänge  $f=0,12$  mm).

Läuft der Unterbrecher so, dass pro Sekunde, wie akustisch ermittelt wurde, durchschnittlich 140 Entladungen erfolgen, so ist der zeitliche Abstand zwischen einer Öffnungs- und Schliessungsentladung 0,0071 Sekunden. So viel sich bei okularer Betrachtung erkennen liess, bestand der „Öffnungsfunke“ aus etwa 20 Partial-

<sup>21)</sup> Eine Annahme, die hier zunächst der Einfachheit wegen gemacht werden soll, in Wirklichkeit aber wahrscheinlich nicht zutrifft.

funken,<sup>22)</sup> die im Zeitraum von ungefähr  $\frac{1}{5}$  der Zeit zwischen zwei Einzelentladungen, also in 0,0014 Sekunden, übergegangen waren. Die Partialfunken erscheinen bei Aluminium anfangs dicht gedrängt, später in wachsenden Abständen voneinander, weshalb bloss von einer mittleren Zeit von 0,00007 Sekunden als Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Partialfunken gesprochen werden kann. Der Welle  $\lambda = 356$  m, mit welcher gearbeitet wurde, entspricht aber eine Schwingungsdauer von 0,00000118 Sekunden, also etwa der siebzigste Teil des mittleren seitlichen Abstandes zweier aufeinanderfolgender Partialfunken. Es lässt sich vermuten, dass durch passendes Steuern der Partialentladungen mittels eines zusätzlichen „Tonkreises“ (hier von der Schwingungsdauer 0,00007 Sekunden) Regelmässigkeit in die Partialfunken gebracht werden könnte. Ist sodann der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Partialentladungen ein ganzes Vielfaches der Schwingungsdauer des die Funkenstrecke enthaltenden Kreises, so ist bei Gleichmässigkeit der Vorgänge ein Kumulieren der Amplituden und damit eine Vergrösserung des Stromeffektes möglich. Wichtiger scheint mir jedoch die Beziehung

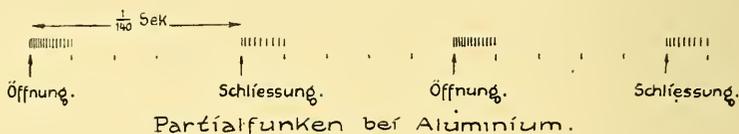


Fig. 8.

zwischen Abstand und Partialentladungen und Schwebungsdauer gekoppelter Kreise zu sein. Gewisse, zuweilen bei bestimmten Koppelungsgraden auftretende ausserordentliche Steigerungen des Stromeffektes im angestossenen Kreise lassen vermuten, dass zwischen Schwebungsdauer und Partialfunkenfrequenz einfache Beziehungen bestehen mussten. Erst genaue Untersuchungen hierüber vermögen jedoch die Verhältnisse aufzuklären.

Wie nun schon aus den Bemerkungen zu den verschiedenen Koppelungskurven und ihrer Entstehung hervorgeht, entwickeln nicht alle Funkenstrecken gleiche Partialfunkenverhältnisse, vielmehr scheint es Fälle zu geben, bei welchen eine grosse Zahl von Nachzüglern auftritt, andre hingegen, bei denen die Bildung von Partialentladungen stark beeinträchtigt ist. Unter den Partialfunken selbst gibt es wieder solche, die „mager“ aussehend und rasch verklingend, guten Stoss liefern, während andererseits breite, mit Aureolen behaftete, der Stosswirkung im Allgemeinen ungünstige Partialfunken beobachtet werden.

<sup>22)</sup> Auf die Schliessungsentladung scheinen jeweils weniger zu entfallen.

In diesem Zusammenhange bietet ein Vergleich der Effektivstromstärken im ungekoppelten Kreis I bei Variation von Elektrodenmaterial und Einbettungsgas unter sonst gleichen Umständen einiges Interesse: In den Kreis I wurde ein aus Hitzdraht, Thermoelement und empfindlichem Galvanometer bestehender Strommesser eingebaut. Die Feinheit des Nickel-Hitzdrahtes (0,1 mm) gewährleistete die Zulässigkeit der Gleichstrommessung, während dank der Empfindlichkeit der Thermokombination und des Galvanometers ein kurzer Hitzdraht genügte. Damit war die Dämpfung des Kreises I, der ja ohnehin die stark dämpfende Funkenstrecke enthält, nicht wesentlich verändert.

Bei einer konstanten Primärstromstärke von 2,8 Ampères effektiv unter 32 Volt Spannung am Induktor, konstanter Unterbrechungszahl und verschwindend kleinem Widerstand in den Zuleitungen der Sekundärspule des Induktors zur Funkenstrecke erhielt ich für die hier ausschliesslich verwendete Funkenlänge von  $f = 0,12$  mm an Kugeln: im Kreise I (Kapazität 1480 cm, Selbstinduktion 21 700 cm, Wellenlänge 356 m) das in Tabelle I wiedergegebene Zahlenmaterial. Die erste Spalte enthält die Angaben über die Natur der Funkenstrecke, in der zweiten Spalte sind die Werte der Effektivstromstärke  $i_1$  im Kreise I (in Milliampères) wiedergegeben. Spalte 3 stellt die logarithmischen Dekremente  $\delta_1$  des Kreises I dar, während Spalte 4 die aus den Kopplungskurven ermittelten höchsten Stromeffekte  $i_{III}^2$  (in Skalenteilen) im Messkreise zusammenstellt und Spalte 5 somit die günstigsten Kopplungsgrade  $K$  gibt. Über die Dekremente und ihre Ermittlung noch kurz folgendes. Sie sind, soweit dies überhaupt möglich war, mittels des Wellenmessers unter der Annahme bestimmt, dass die Berechnung des Dekrements eines Kreises mit sehr kurzer (Lösch-)Funkenstrecke nach der vereinfachten Bjerknæs'schen Methode zulässig sei. Das ist sicherlich eine unzutreffende Voraussetzung, da bei kurzen Funken erstens nur von einem mittleren Dekrement gesprochen werden kann und ausserdem die Resonanzkurven von Kreisen mit rasch abreissenden Funken einseitig verzerrt sind.<sup>23)</sup> Ohne in die spezielle Diskussion der verwickelten Verhältnisse einzutreten, soll nur noch bemerkt werden, dass es sich hier lediglich um einen Vergleich der verschiedenen Elektrodenmaterialien und Einbettungsgase bei Zulassung von Partialfunken handelt und aus den Zahlenangaben nur qualitative Schlüsse gezogen werden.

<sup>23)</sup> Man vergleiche etwa *Riegger*, Diss. p. 18.

Tabelle I.

Gas	Metall	$i_1$ Milliamp.	$\delta_1$	$i_{III}^2$ Skalenteile	K Prozente
Luft	Magnesium	300	0,564	5,8	9
	Kupfer	328	0,528	12,0	29
	Aluminium	257	0,816	9,0	28
	Eisen	264	0,725	12,5	29
	Zink	253	0,751	9,0	29
Wasserstoff	Magnesium	253	0,823	9,5	18
	Kupfer	178	—	2,5	15
	Aluminium	236	0,94*	9,1	27
	Eisen	165	—	2,0	25
	Zink	160	—	1,0	50
Sauerstoff	Magnesium	296	0,485	5,0	8
	Kupfer	352	0,434	8,0	10
	Aluminium	285	0,710	11,4	20
	Eisen	284	0,744	10,5	21
	Zink	270	0,778	9,8	26
Leuchtgas	Magnesium	180	—	9,6	33
	Kupfer	286	0,970	11,0	29
	Aluminium	188	—	11,0	29
	Eisen	283	0,984	10,5	27
	Zink	300	0,830	12,0	29

Zwischen Stromeffekt, Anfangspotential und Dämpfung in einem Kreise mit Funkenstrecke lässt sich, wie schon erwähnt (cet. par.), eine Beziehung aufstellen, die hier zur Prüfung über die Grössenverhältnisse der ermittelten Dämpfungen verwendet werden kann, nämlich:

$$\frac{i_2^2}{i_1^2} = \frac{V_2^2 \delta_1}{V_1^2 \delta_2}$$

Kombiniert man die in Tabelle I wiedergegebenen Werte für Luft, so ergibt sich Tabelle II. Die Verhältnisse der Quadrate der Funkenpotentiale werden, da sie hauptsächlich vom Gase und wenig vom Metalle abhängig sind,<sup>24)</sup> nicht weit von 1 entfernt sein; wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht, wirken die Partialentladungen

<sup>24)</sup> *Taege* hat in seiner zitierten Dissertation auf pag. 21 und 22 Werte für die Effektivspannungen an kurzen Funkenstrecken unter Vermeidung von Partialentladungen gegeben, die zeigen, dass obige Voraussetzung unter den hier vorliegenden Bedingungen namentlich für den Vergleich zwischen Kupfer, Aluminium und Zink berechtigt ist.

offenbar ausgleichend, sodass das Verhältnis der Stromeffekte in der Hauptsache durch das reciproke Verhältnis der Dekremente bedingt ist.

Tabelle II.

	zu Cu	zu Al	zu Fe	zu Zn	
Magnesium	0,837	1,364	1,292	1,406	$i_2^2 / i_1^2$
	0,936	1,447	1,285	1,332	$d_1 / d_2$
Kupfer		1,629	1,544	1,681	$i_2^2 / i_1^2$
		1,545	1,373	1,422	$d_1 / d_2$
Aluminium			0,948	1,032	$i_2^2 / i_1^2$
			0,889	0,920	$d_1 / d_2$
Eisen				1,039	$i_2^2 / i_1^2$
				1,036	$d_1 / d_2$

Berücksichtigt man die Unsicherheiten, die infolge der schwankenden Partialfunkenzahlen und der oben erwähnten Zweifel an der Zulässigkeit der Bjerknes'schen Methode für die Dekrementbestimmung in den Zahlenangaben unvermeidlich waren, so ist die Übereinstimmung eine verhältnismässig gute zu nennen.

Nicht so gut stimmen die Zahlen, die auf dieselbe Weise für die Funken in Sauerstoff erhalten wurden. Es wird dieser Umstand darin seinen Grund haben, dass die starke Oxydation der Kugelelektroden die Unsicherheit der Messungsergebnisse erhöht, weshalb keine weitem Schlüsse gezogen werden sollen.

Interessant sind jedoch die Verhältnisse bei Wasserstoff. In einer oben erwähnten Arbeit beschreibt *Glatzel* eigenartige Versuche am Wechselstromlichtbogen in Wasserstoff. Er verwendet dort drahtförmige Elektroden aus verschiedenen Metallen und beobachtet beim Anlegen eines Schwingungskreises an die Entladestrecke Glimmlichterscheinungen, die von Gleitfunken längs der Elektroden begleitet sind. Besonders hebt er hervor, dass bei Aluminium und Magnesium diese Gleitfunken ausbleiben, während sie bei allen sonst von ihm untersuchten Metallen entstehen. Bei Aluminium und Magnesium

spielte sich der Entladungsvorgang immer zwischen den sich am nächsten gegenüberstehenden Punkten der Elektroden ab. Ganz analog sind die Verhältnisse, die in unserm Falle beobachtet wurden. Die Glimmphase, von einzelnen Partialfunken durchsetzt, charakterisiert die Entladung bei Kupfer, Eisen und Zink, während Aluminium mit einer auffallend purpurroten Wasserstoffentladung und Magnesium mit zahlreichen hellgrünen Teilfunken abseits stehen. Der rotierende Spiegel löst, wie in der Beschreibung der Entladungen erwähnt, die rote Aluminiumentladung wie die grüne Magnesiumentladung in zahlreiche regelmässige Partialfunken auf, während bei Kupfer, Eisen und Zink Glimmlicht, untermischt mit seltenen feinen Einzelfunken und an den Elektroden hochwandernden Gleitfünkchen zu beobachten sind. Dementsprechend sind die Stromeffekte im ungekoppelten Kreise I hoch bei Aluminium und Magnesium, niedrig bei Kupfer, Eisen und Zink. In Tabelle I fehlen die Angaben der Dekremente für letztere Metalle wegen der geringen Stromstärken im Funkenkreise.<sup>25)</sup> Um Messungen anstellen zu können, hätte der Kreis III (Wellenmesser) eng mit dem Kreise I gekoppelt werden müssen; dadurch wäre aber eine verzerrte Resonanzkurve und damit eine unrichtige Dekrementbestimmung verbunden gewesen.

Da während der Glimmphase die Entladung inaktiv ist, für die Schwingungserregung also nur die eigentlichen Funken in Betracht kommen, so interessierte mich die Frage, in welchem Zusammenhang die Zahl der wirksamen Einzelfunken mit der Speisung der Funkenstrecke durch den Induktor stehe. Zur Klärung dieser Frage traf ich folgende Anordnung: In eine der Leitungen zwischen Induktor und Funkenstrecke wurde ein veränderlicher Wasserwiderstand eingeschaltet und zur Kontrolle der Funkenzahl ein aus Spule, Telefon und Detektor bestehender aperiodischer Kreis lose mit dem Kreise I gekoppelt. Für verschiedene Vorschaltwiderstände (in cm Wassersäule gemessen) ermittelte ich den Effektivstrom im Kreise und gelangte zu den in Fig. 9 wiedergegebenen charakteristischen Resultaten:

Die Entladung des Induktors zwischen Kupferkugeln in Wasserstoff bei 0,12 mm Funkenlänge, welche aus einem von einzelnen Funken (auch Gleitfunken s. o.) durchsetzten intermittierenden Glimmlicht besteht, lässt beim Steigen des Speisestromes an der Funkenstrecke nur ein mässiges Anwachsen des Stromeffektes im Schwingungskreise zu. Die Bildung von Partialfunken erscheint stark

<sup>25)</sup> Der mit einem Sternchen bezeichnete Wert des Dekrements für Aluminium ist eine durch Vergleich der Effektivstromstärken bei Magnesium und Aluminium nach der Methode von Tabelle II gewonnene Schätzung.

erschwert. Im Telephon des aperiodischen Kreises ist der Ton des Unterbrechers nur wenig durch Partialentladungen verunreinigt. Mit zunehmender Betriebsdauer sanken übrigens die Werte von  $i_1$  noch merklich.

Magnesium und Aluminium lassen hingegen mit Anwachsen des Speisestroms auch den Strom im Schwingungskreise beträchtlich anwachsen, indem eine Steigerung der Partialfunkenzahl (äusserlich schon an der Zunahme des „Volumens“ und der Leuchtkraft der Ent-

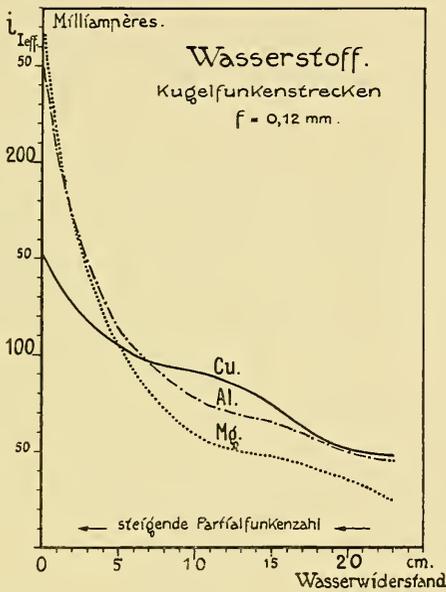


Fig. 9.

ladung kenntlich) erfolgt. Bei Magnesium wurden mit primär vier Ampères effektiv  $i_1 = 336$  Milliampères effektiv im Schwingungskreise erzielt.

Ein Vergleich von Kupfer- und Aluminiumplatten in Luft ergab, dass in diesem Falle eine parallele Steigerung der Effektivstromstärke mit dem Speisestrom an der Funkenstrecke vorlag. Die Zahlen sind in Tabelle III zusammengestellt. Stromstärken in Milliampères effektiv.

Tabelle III.

Wasser- widerstand	Luft		Wasserstoff		
	Kupfer- platten	Aluminium- platten	Kupfer- kugeln	Aluminium- kugeln	Magnesium- kugeln
23 cm	47 M. A.	36 M. A.	50 M. A.	47 M. A.	25 M. A.
19 "	58 "	50 "	54 "	54 "	38 "
15 "	66 "	54 "	74 "	65 "	48 "
11 "	92 "	68 "	88 "	74 "	54 "
7 "	132 "	108 "	97 "	97 "	82 "
5 "	164 "	128 "	105 "	113 "	108 "
0 "	312 "	270 "	153 "	252 "	268 "

Die Kurven der Fig. 4 sind also folgendermassen zu deuten: Bei konstanter Energie am Induktor ergeben sich aus der Bildung einer inaktiven Entladungsart (Glimmlicht) bei Kupfer, Eisen und Zink grosse Verluste in der Funkenstrecke. Auch beim Steigern des Speisestromes wächst die Zahl der aktiven Partialentladungen nur wenig. Demgemäss ist der Anteil der Energie, welcher in die Stoss-  
welle (Eigenwelle des angestossenen Kreises) kommt, klein im Vergleich zum Primäraufwande. Das schliesst nämlich nicht aus, dass die Stosswirkung trotzdem bei höhern Kopplungsgraden eine reine sei! Bei Aluminium und Magnesium dagegen wird ein grosser Teil der Primärenergie durch Bildung zahlreicher Partialfunken, deren Zahl mit steigendem Primärstrom stark wächst, in die Stoss-  
welle gesteuert, die Verluste in der Funkenstrecke sind eben hier viel geringer.

Auch bei den Kurven, die in Leuchtgas erhalten wurden, trennt sich die Gruppe Aluminium-Magnesium namentlich bei sehr engen Kopplungen von der Gruppe der schweren Metalle Kupfer, Eisen und Zink ab.<sup>26)</sup> Dass in Kohlenwasserstoffen und Gemischen von solchen mit Wasserstoff die Stosserregung leicht erzielbar ist, bedarf keiner weiteren Bestätigung mehr.

### Zusammenfassung.

1. Zwei bezüglich Kapazität und Selbstinduktion nahezu gleich gebaute Schwingungskreise I und II werden in direkter Schaltung gekoppelt. Kreis I enthält eine kurze ( $f = 0,12$  mm) Kugelfunken-

<sup>26)</sup> Es sei noch auf die schon bei den einzelnen Versuchsbeschreibungen erwähnte Tatsache aufmerksam gemacht, dass bei Aluminium und Magnesium eine geringe, bei Kupfer, Eisen und Zink eine starke Kohleabscheidung beim Funkenübergang in Leuchtgas zu beobachten ist!

strecke. Kreis II ist funkenlos und schwach gedämpft. Die Kopplung variiert in 20 Stufen zwischen 8 0/0 und 83 0/0. Bei gleichzeitiger okularer Beobachtung der Entladung wird in einem lose mit II gekoppelten, auf die Eigenwelle ( $\lambda = 356$  m) des letzteren eingestellten Messkreise III der jeweils in die Stosswelle gesteuerte Stromeffekt gemessen. Zur Aufladung der Kapazität dient ein mit unterbrochenem Gleichstrom gespeisener Induktor.

2. Zur Untersuchung gelangten die Metalle Magnesium, Kupfer, Aluminium, Eisen und Zink in den Gasen Luft, Wasserstoff, Sauerstoff und Leuchtgas.

3. Im Gegensatz zu den Untersuchungen der meisten anderen Autoren wird das Entstehen von Partialfunken zugelassen und der Einfluss derselben auf die Stosserregung beurteilt.

4. Namentlich Aluminium entwickelt in allen verwendeten Gasen zahlreiche magere Partialfunken.

5. In Wasserstoff geht bei Kupfer, Eisen und Zink ein grosser Teil der Primärenergie für die Schwingungserregung durch Bildung inaktiver Glimmentladung zwischen den Elektroden verloren. Dies ist in bedeutend geringerem Grade bei Magnesium und Aluminium der Fall. Diese beiden Metalle lieferten unter den hier gewählten Umständen kräftige Stosswirkung.

6. In Leuchtgas hebt sich die Gruppe Magnesium-Aluminium ebenfalls deutlich von der Gruppe Kupfer, Eisen und Zink ab, indem noch bei verhältnismässig engen Kopplungen ein beträchtlicher Teil der aufgewandten Energie in die Stosswelle gedrängt wird. (Die Russabscheidung ist auffallenderweise bei Magnesium und Aluminium bedeutend geringer, wie bei den übrigen Metallen.)

7. Ein Vergleich der Stromstärken und Dämpfungen im ungekoppelten Kreise I bei verschiedenen Funkenstrecken gibt ein Bild von der Grösse der Funkendämpfung und der Verluste, die bereits im stossenden Kreise auftreten. Die grossen Dämpfungen mancher Funkenstrecken stehen in direktem Zusammenhange mit den durch die zahlreichen Partialfunken stark herabgedrückten Entladungspotentialen.

Zum Schlusse erfüllt der Verfasser eine angenehme Pflicht, indem er dem Erziehungsdepartement von Basel-Stadt seinen herzlichsten Dank für die Gewährung eines namhaften Beitrages ausspricht, ohne welchen die Durchführung der oben beschriebenen Versuche nicht möglich gewesen wäre.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Basel](#)

Jahr/Year: 1915

Band/Volume: [26\\_1915](#)

Autor(en)/Author(s): Zickendraht Hans

Artikel/Article: [Über stosserregende Partialfunken bei verschiedenen Funkenstrecken 142-171](#)