

**6. Ueber die im Entladungsfunken  
eines Condensators entwickelte Wärme; von  
W. Kaufmann.**

---

1. *Literatur.* Ueber die im electrischen Funken entwickelte Wärme liegen Untersuchungen vor von: Paalzow<sup>1)</sup>, G. Wiedemann<sup>2)</sup>, Naccari und Bellati<sup>3)</sup>, Poggendorff<sup>4)</sup>, Dewar<sup>5)</sup>, Rollmann<sup>6)</sup>, Naccari<sup>7)</sup>, Villari<sup>8)</sup>, G. Mugna<sup>9)</sup>.

Eine kurze Inhaltsübersicht der wichtigsten Arbeiten befindet sich bei: Wiedemann, *Electricität* IV. 2; p. 716 ff. 1885.

Zur Messung der Wärmeentwicklung dienten in den oben citirten Arbeiten das Luftthermometer nach Riess oder Kinnersley (vgl. Wiedemann IV. 2), das Thermoelement und das Quecksilberthermometer. In qualitativer Hinsicht stimmen die Resultate der genannten Beobachter mit den meinigen überein, doch war eine quantitative Vergleichung ausgeschlossen, da eine Berechnung der entwickelten Wärmemengen in absolutem Maasse bei den citirten Messmethoden auch nicht annähernd möglich war.

2. Zweck der vorliegenden Arbeit ist, die im Entladungsfunken entwickelte Wärme in absolutem Maasse zu bestimmen und mit der Gesamtenergie der Entladung zu vergleichen. Zu diesem Zwecke musste einerseits ein Calorimeter hergestellt werden, das bei genügender Empfindlichkeit eine absolute Aichung zuliefs, andererseits musste das Entladungspotential sowie die Capacität der Leydnerflaschen bestimmt werden.

---

1) Paalzow, *Pogg. Ann.* 127. p. 126. 1866.

2) G. Wiedemann, *Pogg. Ann.* 158. p. 35. 1876.

3) Naccari und Bellati, *Beibl.* 2. p. 720. 1878.

4) Poggendorff, *Pogg. Ann.* 94. p. 632.

5) Dewar, *Proc. Roy. Soc. Edinb.* 7. p. 699. 1872.

6) Rollmann, *Pogg. Ann.* 134. p. 605. 1868.

7) Naccari, *Atti di Torino* 17. 26. Febr. 1882; *Beibl.* 6. p. 599. 1882.

8) Villari, *Beibl.* 3. p. 713; 4. p. 404 u. 407; 5. p. 460; 6. p. 699;

7. p. 782.

9) G. Mugna, *Beibl.* 6. p. 953.

3. *Versuchsmethode:* Aus einigen Versuchen von Riess<sup>1)</sup> sowie aus von mir selbst angestellten Vorversuchen ging hervor, dass die Funkenwärme meist nur einen kleinen Bruchtheil der Gesamtenergie ausmacht; eine einfache Ueberschlagsrechnung zeigte deshalb, dass das Eiscalorimeter für die Messung so kleiner Wärmemengen zu unempfindlich ist. Auch das Dampfcalorimeter von Neesen hätte nur in den günstigsten Fällen ausgereicht.

Ich gab deshalb dem Luftthermometer den Vorzug, jedoch in einer von der bisher gebräuchlichen abweichenden Form, welche ich einem Vorschlage des Hrn. Prof. Warburg verdanke.

Bei dem Riess'schen Luftthermometer wird nämlich im Wesentlichen eine Druckänderung der Luft bei annähernd constantem Volumen gemessen; man muss deshalb, wie von Riess<sup>1)</sup> mathematisch entwickelt wurde, zur Erzielung grosser Empfindlichkeit das Volumen der Thermometerkugel möglichst klein machen. Dadurch werden: 1. die Wärmeverluste bedeutend vergrössert, 2. lassen sich die Ausschläge, die von Funken hervorgebracht werden, mit den von Drahtwiderständen erzeugten nicht vergleichen, da der Ausschlag des Tropfens im ersten Falle mit viel grösserer Geschwindigkeit erfolgt, als im zweiten, und deshalb die Wärmeverluste in beiden Fällen sehr verschieden sind.

Von beiden Uebelständen kann man sich befreien, wenn man die Thermometerkugel möglichst gross wählt und behufs Erlangung genügender Empfindlichkeit nicht die Druckvermehrung, sondern die Volumvermehrung bei annähernd constantem Druck zur Messung benutzt. Letztere ist, wie leicht einzusehen, von der Grösse des benutzten Gefässes ganz unabhängig. Der den Abschlusstropfen in Bewegung setzende Ueberdruck hingegen wird mit zunehmendem Volumen des Thermometers immer kleiner; die Ausschläge erfolgen deshalb langsam, sodass die Zeit, welche ein sehr dünner Draht zur Abgabe seiner Wärme an die Luft gebraucht, gegenüber der Dauer der Tropfenbewegung verschwindet; es sind deshalb die durch Erwärmung eines Drahtes hervorgerufenen Ausschläge mit den durch Funkenwärme entstehenden direct vergleichbar. Durch

---

1) Riess, Lehre von der Reibungselectricität.

die Versuche ergab sich denn auch, dass bei dem weiter unten zu beschreibenden Luftthermometer die Dauer des Tropfenausschlags dieselbe war bei Funken- wie bei Drahtwärme.

Die endgültige Form, die ich dem Apparat gab, war folgende (Fig. 1):

Ein Glaskolben ( $V_1$ ) von etwa 7000 cm<sup>3</sup> Inhalt trägt auf seinem Halse einen aufgekitteten Messingconus ( $K_1$ ), auf welchen ein zweiter Conus ( $K_2$ ) luftdicht aufgeschliffen ist. Der Deckel des letzteren ist mit 4 Hülsen ( $H$ ) versehen (in der Zeichnung sind nur 3 sichtbar), in welche Glasröhren luftdicht eingekittet sind. Von letzteren communicirt eine (in der Zeichnung unsichtbar) durch einen Hahn direct mit der Aussenluft, die zweite trägt ein Schliffstück ( $S$ ), an dass sich der eigentliche Messapparat anschliesst, die dritte und vierte ragen bis in die

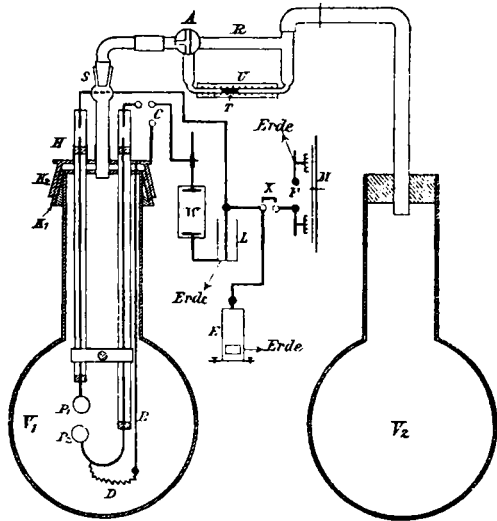


Fig. 1.

Mitte des Ballons hinein und dienen als Schutzhüllen für 4 mm dicke Kupferdrähte, die an ihrem unteren Ende die Kugeln ( $P_1$ ,  $P_2$ ) tragen; letztere sind auf die Drähte aufgeschraubt und können durch Drehen voneinander entfernt oder genähert werden. Etwa 1 cm unterhalb ihres oberen Endes sind die Drähte in den Glasröhren mit Siegelack eingekittet; in das etwa 2 cm überragende Ende der Röhren wird Quecksilber eingegossen, in welches die Zuleitungsdrähte einfach hineingesteckt werden. Ausser den genannten führt noch ein dritter Draht ( $B$ ) in das Gefäss, derselbe hat mit  $K_2$  metallischen Contact und ist durch einen 0,004 cm dicken und ungefähr 20 cm langen Platindraht ( $D$ ) mit der Kugel ( $P_2$ ) verbunden.

Von dem Schliffe ( $S$ ) aus führt ein Glasrohr unter Zwischenschaltung eines kurzen Stücks Gummischlauch zu dem Dreiweghahn ( $A$ ), mittels dessen man entweder durch das Rohr ( $R$ ), oder durch das Rohr ( $U$ ) die Verbindung mit einem zweiten Glaskolben ( $V_2$ ) von etwa  $14000 \text{ cm}^3$  Inhalt herstellen kann. Das Rohr ( $U$ ) ist  $0,25 \text{ cm}$  weit und enthält einen ungefähr  $20 \text{ mm}$  langen Xyloltropfen ( $T$ ), dessen Ausschläge an einer untergelegten, auf Spiegelglas getheilten Scala abgelesen werden können. Das Gefäß ( $V_2$ ) hat den Zweck, die Einstellung des Tropfens von Barometerschwankungen unabhängig zu machen. Gegen Temperaturschwankungen sind beide Gefässe durch Einhüllen in Holzwohle geschützt.

Zur Erzeugung der Electricität dient eine von einem Wassermotor getriebene Influenzelectrisirmaschine ( $M$ ), von deren Polen ( $F$ ) der eine zur Erde abgeleitet ist, während der andere durch den Ausschalter ( $X$ ) zu einer Batterie von 9 Leydnerflaschen führt, deren Capacität zu je  $0,006$  Mikrofara<sup>d</sup> bestimmt wurde.<sup>1)</sup>

Die äussere Belegung der Batterie ist ebenfalls mit der Erde verbunden. Von der inneren Belegung führt ein Draht zu dem in Volt geachten Righi'schen Electrometer ( $E$ ), ein zweiter führt direct zum Zuleitungsdraht der Kugel ( $P_1$ ); von der äusseren Belegung geht die Leitung zu einem verstellbaren Flüssigkeitswiderstande ( $W$ ) [ $\text{ZnSO}_4$  und  $\text{Zn}$ -Electroden], von diesem zu einem Umschalter ( $C$ ), welcher entweder durch den Draht  $B$  und  $D$  oder direct mit der Zuleitung zur Kugel ( $P_2$ ) verbunden werden kann. Sämmtliche Leitungen bestehen aus  $0,4 \text{ cm}$  dickem Kupferdraht und sind möglichst rechtwinklig und geradlinig geführt, sodass die Selbstinduction, und aus dieser, sowie der bekannten Capacität der Flaschen die Oscillationsdauer der Entladung berechnet werden kann. Letzteres ist deshalb nöthig, weil der Widerstand der Leitungen von der Oscillationsdauer abhängig ist; er beträgt bei meinem Apparate je nach der Flaschenzahl das 80 bis 150fache des aus der Leitfähigkeit bestimmten Widerstandes für Gleichstrom. Zur Berechnung diente die von Stefan<sup>2)</sup> angegebene

1) Der Durchmesser der Flaschen betrug  $20 \text{ cm}$ , die Höhe der Belegungen  $36 \text{ cm}$ .

2) Stefan, Wied. Ann. 41. p. 400. 1890.

Formel:  $w'/w = \pi a \sqrt{n\mu}/\sigma$ ; hierin bedeutet  $w'$  den Widerstand für Schwingungen,  $w$  den Widerstand für Gleichstrom,  $a$  den Radius des Drahtquerschnittes,  $n$  die Schwingungszahl,  $\mu$  die Magnetisirungsconstante des Drahtes [für Kupfer = 1],  $\sigma$  seinen specifischen Widerstand in absoluten electromagnetischen Einheiten. Aus dieser Formel ergeben sich bei meinem Apparate Zuleitungswiderstände bis zu 0,60 Ohm. Bei dem Flüssigkeitswiderstände konnte seines hohen specifischen Widerstandes und seiner geringen Selbstinduction wegen  $w' = w$  gesetzt werden.

4. *Aichung des Luftthermometers.* Zur Aichung des Luftthermometers wurde die Batterie durch den Draht ( $D$ ) und die Funkenstrecke ( $P_1 P_2$ ) entladen. Der Draht hatte einen Widerstand von etwa 10 Ohm für Gleichstrom, also für schnelle Schwingungen einen bedeutend höheren; man kann deshalb, wenn ( $W$ ) kurzgeschlossen ist, annehmen, dass die gesammte Energie der Batterie im Luftthermometer in Wärme verwandelt wird (s. p. 661). Wenn man also das Entladungspotential mittels des Electrometers bestimmte, so konnte man die gemessenen Anschläge auf absolutes Maass zurückführen. Eine auf diese Weise ausgeführte Aichung ergab, dass 1 mm Tropfenausschlag eine Wärmemenge von 0,00116 g-Calorien entsprach.

War der Querschnitt ( $s$ ) des Rohres  $U$ , sowie die Volumina  $V_1$  und  $V_2$  genau bekannt, so konnte man auch theoretisch den Werth der Ausschläge in g-Calorien ableiten. Es ist nämlich die entwickelte Wärmemenge:

$$(I) \quad q = x \cdot s \cdot C_p \cdot \varrho_0 \cdot T \frac{V_1 + V_2}{V_2}.$$

(Hierbei bedeutet  $x$  den Ausschlag des Tropfens in Centimetern,  $C_p$  die specifische Wärme der Luft bei constantem Druck,  $\varrho_0$  ihre Dichtigkeit bei 0° C., und dem im Apparat herrschenden Druck,  $T$  die absolute Temperatur.)

Die Rechnung ergab jedoch wegen der in der Gleichung nicht berücksichtigten Wärmeverluste nur etwa die Hälfte des nach obiger Methode gefundenen Werthes.

5. Was die erreichbare Genauigkeit anbetrifft, so ist dieselbe nicht sehr gross, wie ja auch bei einem so wenig regelmässigen Vorgang, wie es die Funkenentladung ist, nicht anders zu erwarten. Bei mehreren aufeinander folgenden

Entladungen betrug die Abweichungen vom Mittel im Durchschnitt etwa 5 Proc., doch kamen manchmal abnorme Abweichungen bis zu 12 Proc. vor. Besonders die ersten Funken nach einer längeren Pause gaben oft zu grosse Ausschläge. Ich konnte durch Beobachten des Entladungspotentials leicht feststellen, dass dieses dann abnorm hoch war, eine Thatsache, die offenbar durch ein Verzögerungsphänomen<sup>1)</sup> bedingt ist.

6. Bei den eigentlichen Versuchen, deren Resultate im folgenden mitgetheilt sind, wurde der Umschalter ( $C$ ) direct mit der Zuleitung zur Kugel ( $P_2$ ) verbunden und die Batterie so lange geladen, bis von selbst die Entladung durch ( $P_1 P_2$ ) eintrat.

7. *Resultate.* In den folgenden Tabellen bedeutet  $V_0$  das Entladungspotential in Volt,  $N$  die Flaschenzahl,  $W$  den Gesamtwiderstand (Flüssigkeit + Zuleitung) in Ohm,  $q$  die beobachtete Wärme in g-Calorien,  $Q$  die Gesamtenergie der Batterie in g-Calorien.

#### A. Funkenstrecke zwischen Zinkkugeln.

Tabelle I.

 $V_0 = 15300$ 

$N = 8$ $Q = 1,35$		$N = 4$ $Q = 0,672$		$N = 2$ $Q = 0,336$	
$W$	$q$	$W$	$q$	$W$	$q$
0,35	0,150	0,42	0,082	0,50	0,045
0,45	0,116	0,52	0,064	0,60	0,040
0,77	0,082	0,84	0,049	0,92	0,030
1,10	0,068	1,17	0,038	1,25	0,028
1,42	0,055	1,49	0,035	2,20	0,022
2,05	0,047	2,77	0,026	2,85	0,019
2,70	0,041	3,42	0,024	3,50	0,017
3,35	0,038	4,07	0,021	4,15	0,016
4,0	0,034	4,72	0,020	4,80	0,015
4,65	0,032			6,40	0,014
6,25	0,028				

In Fig. 2 sind die Werthe der Tabelle graphisch dargestellt; die Beobachtungen sind durch kleine Kreise gekennzeichnet.

1) Ueber die Verzögerung s. Jaumann, Wied. Ann. 55. p. 656. 1895; Warburg, Ber. d. k. Akad. d. Wiss. zu Berlin 1896, 5. März; Wied. Ann. 59. p. 1. 1896.

zeichnet, während die eingezeichneten Curven nach der empirischen Gleichung  $q = A + B/W$  berechnet sind; die nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmten Constanten  $A$  und  $B$  haben die in der folgenden Tabelle mitgetheilten Werthe (wegen der Zeile 4 bis 6 der Tabelle s. p. 661).

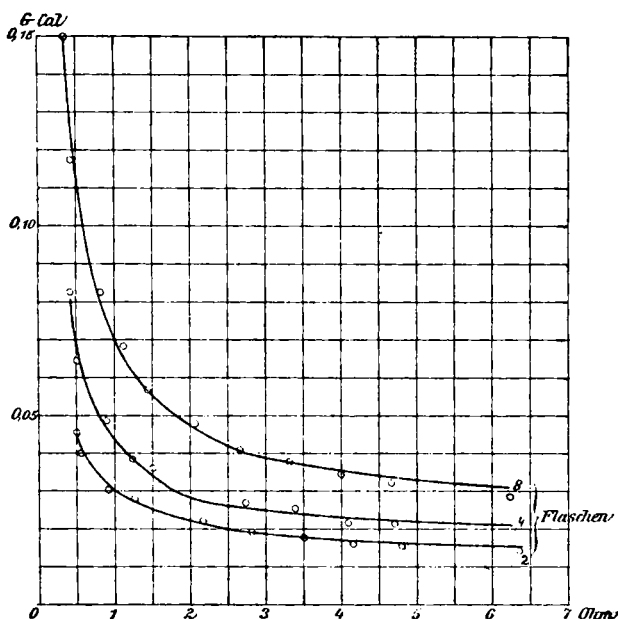


Fig. 2.

Tabelle II.

$N =$	8	4	2
$A =$	0,0243	0,0148	0,0127
$B =$	0,0429	0,0275	0,0166
$\sqrt{8} : \sqrt{4} : \sqrt{2} =$	2	1,41	1
$A_8 : A_4 : A_2 =$	1,91	1,16	1
$B_8 : B_4 : B_2 =$	2,58	1,65	1

Die folgende Tabelle III giebt die Abhängigkeit der Wärmeentwicklung vom Entladungspotential, welches durch Verlängern oder Verkürzen der Funkenstrecke ( $P_1 P_2$ ) variirt wurde:

Tabelle III.

	$V_0 =$	6870	9080	11300	13600	15700
	$Q =$	0,271	0,474	0,735	1,06	1,42
	$q =$	0,016	0,040	0,070	0,116	0,17
I. $W = 0,35$	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{Q} = \\ \frac{q}{V_0^3} \cdot 10^{13} = \end{array} \right.$	0,060	0,085	0,086	0,109	0,118
		0,50	0,53	0,49	0,46	0,44
	$\left\{ \begin{array}{l} q = \\ \frac{q}{Q} = \end{array} \right.$	0,0087	0,020	0,036	0,056	0,081
II. $W = 1,4$		0,032	0,042	0,049	0,053	0,57
	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{V_0^3} \cdot 10^{13} = \\ \frac{q_I}{q_{II}} = \end{array} \right.$	0,27	0,27	0,25	0,22	0,21
		1,9	2,0	1,9	2,1	2,1

Die Funkenwärme wächst also bei steigendem Entladungspotential schneller als die Gesamtwärme. Für nicht zu hohe Entladungspotentiale ist annähernd  $q/V_0^3 = \text{const}$ ; während für die Gesamtwärme gilt  $Q/V_0^2 = \text{const}$ . (vgl. p. 661).

B. *Funkenstrecke zwischen Messingkugeln*. Bei Anwendung von Messingkugeln sind die Resultate im Allgemeinen dieselben, nur sind die Ausschläge des Luftthermometers unter sonst gleichen Umständen kleiner; und zwar beträgt das Verhältniss der entwickelten Wärmemengen:

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

Ein ähnliches Resultat ist schon von Poggendorff<sup>1)</sup> gefunden worden.

8. *Theoretische Betrachtungen*: Legt man sich die Frage vor, ob die beobachteten Erscheinungen sich mit der Annahme eines constanten Widerstandes der Funkenstrecke (bei gleichbleibender Länge) vereinigen lassen, so sieht man leicht, dass dies nicht der Fall ist. Denkt man sich nämlich den Schliessungskreis der Batterie aus zwei Theilen bestehend mit den Widerständen  $w$  und  $W$ , wobei  $w$  dem angenommenen

1) Poggendorff (l. c.).



Widerstände der Funkenstrecke entsprechen soll, so ergibt sich für die in  $w$  entwickelte Wärmemenge:

$$(II) \quad q_w = \frac{c}{2} V_0^2 \frac{w}{w + W},$$

( $c$  ist die Capacität der Batterie.)

Die in  $W$  entwickelte Wärmemenge dagegen beträgt:

$$(III) \quad q_W = \frac{c}{2} V_0^2 \frac{W}{w + W}$$

(Ist also  $w$  klein gegen  $W$ , so wird:

$$(IIIa) \quad q_W = \frac{c}{2} V_0^2 = Q$$

d. i. die Gesamtenergie der Batterie. Auf Gleichung (IIIa) beruht die p. 657 beschriebene Aichung des Luftthermometers).

Vergleicht man nun die Versuchsergebnisse mit Gleichung (II), so findet man, dass jene sich nicht mit der Gleichung in Einklang bringen lassen; es ist nämlich die beobachtete Wärmemenge bei gleichbleibendem  $W$  nicht proportional  $c$  (d. i. der Flaschenzahl), sondern (wie aus Zeile 4 bis 6 der Tab. II, p. 659 hervorgeht) ungefähr ihrer Quadratwurzel. Ferner lässt sich die Abhängigkeit der Wärme vom Widerstande innerhalb der Beobachtungsgrenze ausdrücken durch eine Gleichung von der Form  $q = A + B/W$  (vgl. p. 659); die dieser Gleichung entsprechende Curve ist eine Hyperbel mit der Ordinatenaxe und einer zur Abscissenaxe parallelen Geraden als Asymptoten; Gleichung (II) dagegen verlangt eine Hyperbel mit der Abscissenaxe und einer der Ordinatenaxe parallelen Geraden als Asymptoten. Es ist also nicht möglich, zur Erklärung der beobachteten Erscheinungen der Funkenstrecke die Eigenschaften eines metallischen Widerstandes beizulegen. Viel wahrscheinlicher dürfte die Annahme sein, dass bei der Funkenentladung, ausser einem von den Versuchsbedingungen abhängigen Widerstande, ähnlich wie bei allen anderen Gasentladungen, ein annähernd constantes Potentialgefälle an den Enden der Funkenstrecke vorhanden ist; doch ist mir eine mathematische Formulierung der aus dieser Annahme zu ziehenden Folgerungen nicht gelungen.

Berlin, Physik. Institut. d. Univ., Februar 1897.