7. Beobachtungen
zur Herstellung und Messung hoher Spannungen;
von Hans Lohmann.

I. Herstellung hoher Spannung.

In einer von der bekannten Machschen¹⁾ verschiedenen Art habe ich einen Apparat²⁾ konstruiert, mit Hilfe dessen sich eine Batterie leicht und schnell von Menge auf Spannung schalten läßt. In der schematischen Fig. 1 sind die äußeren Belege von zwei Flaschen durch das Metallstück v_1 , die inneren durch v_2 miteinander verbunden, während die Ladung durch a und b von der Toeplerschen Influenzmaschine M aus erfolgt. Löst man nun die Verbindung mit der Maschine M

Fig. 1.

Fig. 2.

und zieht den isolierten Schieber s in die Höhe, so sind, wie Fig. 2 zeigt, die Flaschen hintereinander geschaltet, so daß bei f der Funken überspringen kann. Das Emporziehen des Schiebers läßt sich durch einen Hebel sicher und schnell bewerkstelligen, wodurch die Umschaltung sehr rasch vorgenommen

1) E. Mach, Anzeiger der Wiener Akademie 1876. p. 107.

2) Ausgeführt von der Firma Meiser und Mertig, Dresden-N.

werden kann. Bei dem zu den Versuchen verwendeten Apparate wurden auf die erwähnte Art fünf große Leidener Flaschen, die in einem Kreise angeordnet waren, miteinander verbunden. Mit Hilfe dieser Vorrichtung war es möglich, experimentell schöne Wirkungen (kräftige Funken bis 32 cm Länge¹⁾ zu erzielen, es ließen sich aber auch Beobachtungen über das Transformationsverhältnis bei der Umschaltung auf Spannung und über die Funkenspannungen zwischen Spitzen bei großen Schlagweiten (bis 32 cm) anstellen.

Zu diesen Messungen wurde, um ein Maß für die Spannung bei nebeneinandergeschalteten Flaschen zu erhalten (Fig. 3), vor die Batterie (L) eine Funkenstrecke F eingeschaltet, die sich von der Batterie kurz vor der Umschaltung auf Spannung mit Hilfe des Bügels B trennen ließ. Der Augenblick der Umschaltung wurde durch sorgfältiges Ausprobieren ermittelt. Ich ließ bei einer bestimmten Funkenstrecke F , während die Influenzmaschine mit konstanter Geschwindigkeit gedreht wurde, mehrere Male hintereinander die Batterie (in Nebeneinanderschaltung) sich bei F entladen und bestimmte die Zeit von einer Selbstentladung bis zur nächsten mit Hilfe eines Metronomes. Von der dritten Entladung an blieb diese Zeit unverändert, so daß der Moment abgepaßt werden konnte, der einer Selbstentladung unmittelbar vorausging. In diesem Augenblicke klappte der Bügel B auf, und die Batterie wurde mit einem kräftigen Ruck auf Spannung geschaltet. Diese Versuche wurden für verschiedene Funkenlängen F (1,3 cm war die Maximalfunkenweite) bei Kugeln von 2 cm Durchmesser ausgeführt und zu jedem F die Maximalschlagweite f ermittelt. Bei f benutzte ich Entladungskugeln von verschiedenen Durch-

Fig. 3.

1) Neuerdings wurden bei einem noch einfacheren Mechanismus mit 6 Flaschen in Vorversuchen Funken von 43 cm Länge zwischen Kugeln erzielt.

messern d (5 cm, 4 cm, 2,3 cm und Spitzen). Die auf die angegebene Weise gemessenen Maximalfunkenweiten f für verschiedene Durchmesser d der Entladungskugeln sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle I.

F in cm	f in cm für $d = 5$ cm	f in cm für $d = 4$ cm	f in cm für $d = 2,3$ cm	f in cm für Spitzen $d = 0$
0,5	2,9	—	—	13,4
0,6	—	—	8	—
0,7	—	—	15,5	18,5
0,8	6	7,5	19	22
0,9	7	9,2	20,5	23
1,0	—	12,5	—	—
1,1	10,5	17	26,5	28,5
1,2	—	19	—	—
1,3	17	24	29,5	32

Trägt man die Mikrometerfunkenweiten F als Ordinaten, die für diese ermittelten Maximalschlagweiten f als Abszissen auf, so ersieht man (aus Fig. 4), daß die Schlagweite f zunächst,

Fig. 4.

wenn $f/d < \text{ca. } 8$ ist, sehr vom Durchmesser d der Entladungskugeln abhängig ist. Erst für $f/d > 8$ hört diese Abhängigkeit fast auf, und die Kurven verlaufen der Spitzenkurve ($d = 0$) ungefähr parallel. Diese letztere ist nahezu eine Gerade.

Aus den in Tab. I zusammengestellten Beobachtungen läßt sich nun zweierlei ermitteln. *Erstens* kann man das Transformationsverhältnis berechnen, das bei der Umschaltung der fünf Flaschen von Menge auf Spannung eintritt, und *zweitens* können auf zwei voneinander verschiedenen Wegen Gleichungen für die Funkenspannungen an Spitzen abgeleitet werden.

Um das Transformationsverhältnis zu berechnen, entnahm ich aus bekannten Tabellen¹⁾ die Spannungen (A_1), welche zu den jeweiligen Funkenweiten F zwischen Kugeln von 2 cm Durchmesser gehören. Hierauf berechnete ich mit Hilfe der von Toepler²⁾ angegebenen Formel:

$$(a) \quad A_2 = 600 d \left(96 + \frac{64}{\sqrt{d}} \right) \frac{f + d}{f + 5,8 d} \text{ (Volt)}, \text{ gültig für } f/d > 1,$$

die Spannungen, welche bei einem bestimmten Durchmesser d der Entladungskugeln den zugehörigen Maximalschlagweiten f entsprechen.

Auf diesem Wege ergaben sich folgende Werte:

Tabelle II.

	F in cm	A_1 in Kilovolt	f in cm	A_2 in Kilovolt	$\frac{A_2}{A_1}$
für $d = 5$ cm	0,5	17,4	2,9	76,17	4,38 ³⁾
	0,8	26,1	6	117,48	4,50
	0,9	28,8	7	128,19	4,45
	1,1	33,3	10,5	146,68	4,40
	1,3	37,2	17	178,79	4,81
für $d = 4$ cm	0,8	26,1	7,5	115,08	4,41
	0,9	28,8	9,2	125,15	4,85
	1,1	33,3	17	160,39	4,81
	1,3	37,2	24	182,24	4,90
für $d = 2,3$ cm	0,6	20,4	8	91,99	4,51
	0,7	23,1	15,5	117,68	5,09
	0,8	26,1	19	121,99	4,67
	0,9	28,8	20,5	128,41	4,46
	1,1	33,3	26,5	187,10	4,12
	1,3	37,2	29,5	141,47	3,80

1) F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik.

2) M. Toepler, Ann. d. Phys. 19. p. 194. 1906.

3) Dieser Fall, wo $f/d < 1$ ist, wurde nach einer anderweitigen Angabe von Toepler berechnet.

Der aus den Werten in dieser Tabelle berechnete Mittelwert für das Transformationsverhältnis bei Umschaltung auf Spannung ist $A_2/A_1 = 4,51$, also ein Wert etwas kleiner als 5, wie zu erwarten war. Da nämlich die Umschaltung auf Spannung in dem Augenblicke vollzogen wurde, der einer Selbstentladung bei F unmittelbar vorausging, so werden die aus der Tab. I entnommenen Werte für A_1 immer etwas größer sein als die tatsächlich vorhandenen Spannungsdifferenzen im Augenblicke der Umschaltung. Außerdem werden bei der Umschaltung und bei der Entladung bei f Verluste eintreten, die den Wert A_2 praktisch nicht ganz die theoretisch zu erwartende Größe annehmen lassen werden (vor allem bei großen Schlagweiten).

II. Bemerkungen über Funkenspannungen an Spitzen.

Um aus den genannten Beobachtungen eine Gleichung für die Funkenspannungen bei *Spitzenentladung* abzuleiten, bediene ich mich zunächst des folgenden Weges. Aus dem oben erwähnten mittleren Transformationsverhältnisse $A_2/A_1 = 4,51$, das ja von der Art der Elektroden (d) unabhängig ist, berechnet man mit Hilfe der für die Mikrometerschlagweiten F bekannten Spannungen A_1 die zu diesen gehörigen Potentialdifferenzen A_2 . Diese müssen dann den beobachteten Funkenweiten f zwischen Spitzen entsprechen. Auf diese Weise ergibt sich die mittlere Reihe in der folgenden Tabelle.

Tabelle III.

F in cm	A_1 in Kilovolt	A_2 in Kilovolt	f in cm	A_2 in Kilovolt nach der Interpolations- formel (b)
0,5	17,4	78,47	13,4	79,41
0,7	23,1	104,18	18,5	103,73
0,8	26,1	117,71	22	120,42
0,9	28,8	129,89	23	125,19
1,1	33,8	150,18	28,5	151,41
1,3	37,2	167,77	32	168,10

Trägt man die aus Tab. III ermittelten Werte von A_2 als Ordinaten in einer Ebene auf, während als Abszissen die

zugehörigen Funkenweiten f dienen (Fig. 5), so erkennt man, daß die Werte für Spitzenentladungen angenähert auf einer Geraden liegen. Man ist also berechtigt, die Spannungsdifferenz bei Spitzenentladung im Beobachtungsbereiche als

Fig. 5.

lineare Funktion der Schlagweite f aufzufassen. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate läßt sich dann aus den beobachteten Werten als Interpolationsformel für Funkenspannung bei Spitzenentladung

$$(b) \quad A = 15,523 + 4,768 f^1)$$

aufstellen. Die mit Hilfe dieser Gleichung berechneten Werte sind in Tab. III zum Vergleiche in die letzte Kolumne aufgenommen worden.

Es läßt sich aber aus den Beobachtungen noch auf einem anderen Wege eine Gleichung für die Funkenspannungen zwischen Spitzen ableiten. Zeichnet man nach Toepler²⁾ die Kurven konstanter Funkenspannung (Fig. 6) in einer Koordinatenebene, in der die Schlagweiten f die Ordinaten und die

1) Nach dieser Formel würde man vergleichsweise folgende Funkenspannungen zwischen Spitzen erhalten

Schlagweiten in cm	10	15	20	25	30	35
Spannungen in Kilovolt	63,2	87,0	110,9	134,7	158,6	182,4

2) M. Toepler, Ann. d. Phys. 19. p. 203. 1906.

Elektroden Durchmesser d die Abszissen sind, so ergibt sich, daß die Punkte L , wie Toepler gefunden hat, auf einer Geraden, in diesem Falle auf der Geraden $(f/d) = \text{ca. } 11$ liegen.

Fig. 6.

Durch Rechnung wurde hierfür die Gleichung $(f/d) = 10,62$ gefunden. Setzt man nun diesen letzteren Wert in die Gleichung (a) ein, so folgt als Formel für die Spannung bei Spitzenentladung:

$$(c) \quad A = 3,838 f + 8,339 \sqrt{f}. \quad 1)$$

Der Wert des konstanten Verhältnisses (f/d) hängt, wie ein Vergleich der bisher bekannten Werte für diesen Quotienten zeigt, besonders von der *Andauer* der Spannungsdifferenz

1) Berechnet man aus dieser Gleichung die Spannungen A_2 , welche zu den beobachteten Funkenweiten zwischen Spitzen gehören, und setzt sie ins Verhältnis zu den entsprechenden Werten von A_1 , die aus dem zugehörigen F folgen, so ergibt sich in annähernder Übereinstimmung mit dem auf anderem Wege berechneten Werte (4,51) $A_2/A_1 = 4,62$ als Transformationsverhältnis.

zwischen den Elektroden bei den einzelnen Entladungen ab. So läßt sich aus dem Diagramm, das Toepler bei seinen Messungen mit dem Paraffintransformator¹⁾ angibt, als geometrischen Ort für die Punkte L die Gerade $(f/d) = \text{ca. } 6$ ablesen. Bei seinen Untersuchungen mit dem Funkeninduktor²⁾ findet derselbe Verfasser $(f/d) = 7,8$ und bei seinen Bestimmungen des Scheitelfaktors an einem Wechselstromtransformator (104 Wechsel in der Sekunde) $(f/d) = 10,4$.³⁾ Bei meinen Messungen wurde $(f/d) = 10,62$ berechnet, und es ist offenbar bei meiner Versuchsanordnung die Andauer der Spannung zur Entladung am größten, während sie bei den vorher erwähnten Beobachtungen um so kürzer ist, je kleiner (f/d) ist. Setzt man die verschiedenen Werte von (f/d) in die Gleichung (a) ein, so ergibt sich, wie aus der nachfolgenden Zusammenstellung zu erkennen ist, daß bei gleicher Funkenweite die Spannung um so größer sein muß, je kürzer die Andauer der Spannung ist.

Um einen Vergleich mit anderen Beobachtungen zu ermöglichen, mögen im folgenden die Spannungen für einige Funkenweiten zwischen Spitzen zusammengestellt werden.

Schlagweiten in cm		10	15	20	25	30	35
Spannungen in Kilovolt	I.	70,3	98,0	124,8	151,0	176,8	202,8
	II.	65,6	91,0	115,6	139,5	163,0	186,2
	III.	64,8	89,9	114,1	137,7	160,8	183,7

Es bedeuten hierbei:

I. Messungsergebnisse von M. Toepler für sehr kurze Andauer der Spannung (Funkeninduktor) bei 5 Proz. Treffer nach der Gleichung

$$A = 4,35 f + 8,48 \sqrt{f}.^4)$$

1) M. Toepler, Ann. d. Phys. 10. p. 741. 1903. (Die Andauer einer Halbschwingung ist hierbei nach Toepler 10^{-6} sec).

2) M. Toepler, l. c. 19. p. 205. 1906.

3) M. Toepler, l. c. 22. p. 128. 1907.

4) Diese Formel ist aus der von Toepler l. c. für 50 Proz. Treffer angegebenen Gleichung für den in derselben Abhandlung gegebenen Unterschied der Schlagweiten bei 50 und 5 Proz. Treffern auf letztere Trefferzahl umgerechnet.

II. Messungsergebnisse von M. Toepler für längere Andauer der Spannung (Wechselstromtransformator, 104 Wechsel) nach der Gleichung

$$A = 3,90 f + 8,4 \sqrt{f}.^1)$$

III. Messungsergebnisse von H. Lohmann für lange Andauer der Spannung (Batterieumschalter) nach der Gleichung

$$A = 3,84 f + 8,34 \sqrt{f}.$$

Die Messungen, welche zu den Gleichungen (b) und (c) führten, wurden bei einem mittleren Barometerstand von 749,1 mm ausgeführt. Da es sich aber bei der angewendeten Methode nur um Relativmessungen handelt, so kommt der Einfluß des Barometerstandes nicht in Betracht.

Zum Schlusse möchte ich Hrn. Prof. Hallwachs für die Erlaubnis, vorstehende Untersuchung im physikalischen Institute der technischen Hochschule Dresden auszuführen, meinen verbindlichen Dank aussprechen.

1) M. Toepler, Ann. d. Phys. 22. p. 128. 1907.

(Eingegangen 6. Februar 1907.)