**6. Über Funkenspannungen (Nachtrag);
von Max Toepler.**

In einer Mitteilung unter gleichem Titel habe ich Anfangs dieses Jahres Messungen über Funkenspannungen angegeben.¹⁾ Hierbei wurde eingehend der Fall behandelt, daß mittels eines großen Induktors von Klingelfuss einzelne zeitlich weit getrennte Strom- bez. Spannungsschöße (ein Stoß in der Sekunde) erzeugt werden. Ein Vergleich der speziell für Funkenspannung zwischen zwei Spitzen bei symmetrischer Versuchsanordnung erhaltenen Ergebnisse mit denen, welche andere Beobachter für die gleiche Elektrodenanordnung, aber andersartigen Induktorbetrieb erhalten haben, zeigte, daß die von mir gefundenen Werte nur wenig höher waren als diejenigen fast aller anderen Beobachter (American Inst., B. Walter, W. Voegé). Zur Berechnung dieser letzteren Werte ist außer effektiver Primärspannung und Übersetzungsverhältnis auch die Kenntnis des Scheitelfaktors nötig. Wo letzterer, wie zumeist, nicht bekannt war, wurde derselbe zu $\sqrt{2}$ angenommen, eine Annahme, welche günstigstenfalls nur angenähert erfüllt sein wird. *Auffallend niedrige* Werte für die Funkenspannungen ergaben sich aus den Beobachtungen von Hrn. W. Weicker durch Multiplikation der von ihm angegebenen effektiven Spannungen²⁾ mit $\sqrt{2}$. Es blieb unentschieden, ob der Grund der genannten großen Abweichungen nur ein scheinbarer ist, nur auf einer beträchtlichen Abweichung des *tatsächlichen* Scheitelfaktors von dem der Berechnung zugrunde gelegten Werte beruht.

Im folgenden sind eine Reihe gemeinsam mit Hrn. Dipl.-Ing. W. Weicker, Elektroingenieur am Laboratorium der

1) M. Toepler, Ann. d. Phys. 19. p. 191. 1906.

2) W. Weicker, Elektrotechn. Zeitschr. p. 948, Fig. 33. 1904.

Porzellanfabrik Hermsdorf¹⁾ ausgeführte Messungen zur Beantwortung der oben genannten Frage mitgeteilt. Diese haben ergeben, daß der hervorgehobene Unterschied in der Tat nur scheinbar ist, d. h. bei Benutzung des wahren besonders bestimmten Scheitelfaktors *verschwindet*.

I. Bestimmung des Scheitelfaktors.

Die gesuchte sekundäre Spannung ergibt sich bekanntlich als Produkt aus effektiver Primärspannung, Übersetzungsverhältnis und Scheitelfaktor. Die effektive Primärspannung war an einem Voltmeter direkt ablesbar, das Übersetzungsverhältnis betrug 2601, es blieb also noch der Scheitelfaktor zu bestimmen.

Um den Scheitelfaktor festzustellen, wurde folgendermaßen verfahren:

Die *Anfangsspannung* an großen Elektroden (d. h. diejenige Spannung, bei welcher zuerst leuchtende Entladung irgend welcher Art im Schlagraume austritt) ist, wie man weiß, (extremste Fälle ausgeschlossen) unabhängig von der Art der Stromzufuhr zu den Elektroden, also speziell auch von der Frequenz und vom Werte des Scheitelfaktors. Nach früheren Feststellungen kennt man nun mit einiger Sicherheit die Anfangsspannung sowohl zwischen zwei großen Kugelelektroden (symmetrische Versuchsanordnung), als auch zwischen großer Kugel und ausgedehnter ebener Platte.²⁾ Bestimmt man also

1) Die Messungen sind mit Hilfe eines in der elektrotechnischen Versuchsstelle der Porzellanfabrik Hermsdorf S.-A. zur Prüfung von Isolatoren aufgestellten Transformators der Siemens-Schuckert-Werke ausgeführt; dieser lieferte bis zu 200 Kilovolt effektive sekundäre Spannung; die Frequenz betrug bei den angestellten Messungen 104 Wechsel in der Sekunde.

Auch an dieser Stelle möchte ich Hrn. Direktor Oskar Arke meinen verbindlichsten Dank für die freundliche Zurverfügungstellung der Räume und Mittel der Versuchsstation aussprechen.

2) Die Werte der Anfangsspannungen lassen sich, wie Ann. d. Phys. 19. p. 192 u. ff. angegeben ist, durch die Interpolationsformeln

$$AS = 600 \cdot d \left(96 + \frac{64}{\sqrt{d}} \right) \frac{f + d}{f + 5,8 d}$$

für solche Elektrodenkombinationen die effektive primäre Anfangsspannung, multipliziert diese mit dem Übersetzungsverhältnisse (in unserem Falle —2601) und dividiert das Produkt in die bekannte wahre (sekundäre) Anfangsspannung, so erhält man den Scheitelfaktor.

Fig. 1.

Der spezielle Aufbau der Elektroden bei symmetrischer Versuchsanordnung ist aus der Aufrißfigur 1 zu ersehen. Es bedeutet:

a und *b* die unterhalb der Zimmerdecke hinlaufenden

für symmetrische Versuchsanordnung und

$$A S = 300 \cdot d \left(96 + \frac{64}{\sqrt{d}} \right) \frac{f + 0,5 d}{f + 2,9 d}$$

für Kugel gegenüber großer Platte rechnen, wobei *d* den Kugeldurchmesser, *f* den Elektrodenabstand (Schlagweite) bedeutet. Leider versagen, wie l. c. auch angegeben ist, diese Formeln für *f*: *d* < 1, bez. *f*: *d* < 0,5; für solche kleine Schlagweiten ist man auf graphische Interpolationen und Extrapolationen des vorhandenen Beobachtungsmaterialies angewiesen.

Die in vorliegender Notiz zugrunde gelegten Werte von Anfangsspannungen gelten genau genommen für 745 mm Luftdruck und 18° C. Die Beobachtungen erfolgten aber bei einem Luftdruck von nahe 735 mm (und 16—20° C.); die in Tab. I und II als berechnet angegebenen Anfangsspannungen sind also um ca. 1½ Proz. zu hoch, die berechneten Scheitelfaktoren also um ebensoviel höher als die wahren. Da nun aber die Grenzspannungen in nahe gleichem Maße vom Luftdrucke abhängen wie die Anfangsspannungen, so gelten die mit dem zu hohen Scheitelfaktor berechneten Spannungswerte von Tab. III auch wieder nicht für 735 mm, sondern für 745 mm Luftdruck.

Tabelle I.

Mittelwerte aus je fünf Einzelbestimmungen.

A. Zwei Eisenkugeln von je 9,95 cm Durchmesser. 104 Wechsel in der Sekunde.

$f = 5,00$ cm; Anfangssp. 129 Kilovolt	Ohm primär vorgeschaltet Kilovolt effekt. sekundär beobachtet Scheitelfaktor berechnet	0,00 86,3 1,50	0,30 87,9 1,47	1,05 91,4 1,41	1,80 92,9 1,39	2,55 94,4 1,37	4,80 96,8 1,34
$f = 7,50$ cm; Anfangssp. 169 Kilovolt	Ohm primär vorgeschaltet Kilovolt effekt. sekundär beobachtet Scheitelfaktor berechnet	0,00 113,3 1,50	— — —	1,50 121,4 1,39	— — —	3,00 125,0 1,35	
$f = 10,05$ cm; Anfangssp. 198 Kilovolt	Ohm primär vorgeschaltet Kilovolt effekt. sekundär beobachtet Scheitelfaktor berechnet	0,00 133,8 1,48	0,75 141,5 1,39	— — —	2,31 145,9 1,36		
$f = 12,50$ cm; Anfangssp. 221 Kilovolt	Ohm primär vorgeschaltet Kilovolt effekt. sekundär beobachtet Scheitelfaktor berechnet	0,00 141,1 1,53	— — —	1,50 157,0 1,41			
$f = 14,83$ cm; Anfangssp. 236 Kilovolt	Ohm primär vorgeschaltet Kilovolt effekt. sekundär beobachtet Scheitelfaktor berechnet	0,00 157,6 1,51	0,75 165,7 1,43	1,28 169,1 1,40			

$f = 17,53$ cm; $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ohm primär vorgeschaltet} \\ \text{Kilovolt effekt. sekundär beobachtet} \\ \text{Anfangssp. 253 Kilovolt} \end{array} \right\}$

$f = 20,00$ cm; $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ohm primär vorgeschaltet} \\ \text{Kilovolt effekt. sekundär beobachtet} \\ \text{Anfangssp. 267 Kilovolt} \end{array} \right\}$

B. Zwei Messingkugeln von je 9,95 cm Durchmesser. 104 Wechsel in der Sekunde.
Kein primärer Vorschaltwiderstand.

Schlagweite f in cm	1	2	3	4	5	6	8
Beobachtete effekt. sekund. Anfangsspannung in Kilovolt	22,4	40,6	56,2	71,5	84,5	96,3	114,4
Berechnete Anfangsspannung in Kilovolt	32,8	61,7	87,0	109,3	129	146	175
Scheitelfaktor berechnet	1,47	1,51	1,55	1,52	1,53	1,52	1,53

Schlagweite f in cm	10	12	14	16	18	20	22
Beobachtete effekt. sekund. Anfangsspannung in Kilovolt	129,4	141	150,6	160	167	173	180
Berechnete Anfangsspannung in Kilovolt	198	217	231	244	255	267	278
Scheitelfaktor berechnet	1,53	1,54	1,53	1,53	1,53	1,55	1,54

Zuführungen vom Transformator — letzterer stand im Nebenzimmer —,

f den Entladungsraum (Funkenstrecke),

s_1 und s_2 die isolierenden Stützen,

$t_1 t_2$ die Tischplatte.¹⁾

Als Elektrodenkugeln dienten einmal gedrehte Eisenkugeln von je 9,95 cm Durchmesser, dann zur Kontrolle Messingkugeln von je 9,95 cm Durchmesser.

Orientierende Versuche zeigten, wie zu erwarten (und wie von Hrn. Weicker bereits früher festgestellt), daß der Scheitelfaktor nicht unbedeutend von dem in den primären Stromkreis eingeschalteten Widerstand abhing.

Tab. I (p. 122—123) gibt unter A. für symmetrische Versuchsanordnung mit zwei *Eisenkugeln* von je 9,95 cm Durchmesser die Schlagweite f in Zentimetern, die zugehörige Anfangsspannung AS in Kilovolt, den in den primären Stromkreis geschalteten Widerstand in Ohm, die abgelesene effektive primäre Anfangsspannung in Kilovolt multipliziert mit 2601 und schließlich den berechneten Scheitelfaktor. Ferner sind (Tab. I unter B.) ebensolche Messungen mit zwei *Messingkugeln* von je 9,95 cm Durchmesser — aber nur mit dem Widerstande Null im primären Kreise — angegeben.

Es schien erwünscht, die Bestimmung des Scheitelfaktors noch auf weitere von den vorangehenden abweichende Beobachtungen zu stützen.

In Tab. II sind nur für den primären Widerstand Null ausgeführte Bestimmungen mit *asymmetrischer* Versuchsanordnung mitgeteilt; als Kugelelektrode diente einmal eine *Eisenkugel* von 9,95 cm, dann eine *Messingkugel* von 9,95 cm Durchmesser. Die von dem Erdboden gut isolierte Tischplatte $t_1 t_2$ in Fig. 1 war hier mit einer *ebenen Messingplatte* bedeckt; die Verbindung derselben mit der Zuleitung b erfolgte fern vom Schlagraume, der einen Zimmerwand entlang. Der andere Pol (*Kugel-*

1) Wie aus den eingetragenen Angaben (in Zentimetern) der einzelnen Entfernungen zu ersehen ist, standen die Tischplatte und die Stützen f dem Entladungsraume immer noch recht nahe; ein weiteres Abrücken, wie dies zu ganz exakten Messungen erwünscht wäre, ließ sich aber in dem beschränkten Versuchsraume ohne anderweitige Störungen nicht erreichen.

Tabelle II.

Mittelwerte aus je fünf Einzelbestimmungen.

A. Eisenkugel von 9,95 cm Durchmesser gegenüber großer ebener Messingplatte; 104 Wechsel in der Sekunde;
kein primärer Vorschaltwiderstand.

Elektrodenabstand f in cm	17,9	22,7	29,8	36,9	47,6	55,8
Beobachtete effektive sekundäre Anfangsspannung in Kilovolt	111,6	122,5	131,1	139,2	152,7	171,3
Berechnete Anfangsspannung in Kilovolt	165,5	182,3	203,5	217	236	246
Scheitelfaktor berechnet	1,48	1,49	1,55	1,56	1,54	1,53

B. Messingkugel von 9,95 cm Durchmesser gegenüber großer ebener Messingplatte; 104 Wechsel in der Sekunde;
kein primärer Vorschaltwiderstand.

Elektrodenabstand f in cm	6	10	14	18	22	26	30	34	40	46	52	60
Effekt. sekundäre Anfangsspannung in Kilovolt	76,7	95,0	106,0	115,0	121,5	126,5	132,0	138,5	146,2	153,0	159,2	168,5
Berechnete Anfangsspannung in Kilovolt	108,9	132,9	153,1	169,5	183,4	195	206	214	226	235	244	253
Scheitelfaktor berechnet	1,41	1,40	1,44	1,47	1,51	1,54	1,56	1,55	1,55	1,54	1,53	1,50

elektrode) hing an seiner Zuleitung frei von *a* herab. Natürlich war die Tischplatte hier nach links unter *a* hin verschoben.

Man ersieht aus den Tab. I und II übereinstimmend, daß der *Scheitelfaktor* zwar von der Spannung abhängt, vom Werte 1,40 rasch ansteigend *bleibt* er dann aber *für ein großes Spannungsintervall fast konstant* gleich 1,53.

II. Entladung zwischen zwei Spitzen.

Steigert man die Größe der Wechselspannung zwischen zwei Spitzen (oder auch kleinen Kugelelektroden), so tritt im Entladungsraume nacheinander auf:

Lichtloses Fließen,

Grenze heißt Anfangsspannung (AS);

Glimmentladung (auch Spitzenstrom genannt),

Grenze heißt Grenzspannung der Glimmentladung (GS);

Büschelentladung (oder auch zahlreiche Büschel, d. h. Streifenentladung),

Grenze heißt Grenzspannung der Büschelentladung (bez. der Streifenentladung) GSB bez. GSS ;

Büschellichtbogen (auch Glimmstrom genannt) etc.

An jeder Grenze können unter Umständen Funken auftreten. *Funkenspannung* (FS) kann also identisch sein mit Anfangsspannung oder irgend einer Grenzspannung.

Steigert man jeweils die Wechselspannung ganz allmählich und beobachtet die Entladungserscheinungen im Schlagraume, so kann man bei einiger Übung jederzeit sofort angeben, welcher der genannten Grenzen die Funkenbildung angehört.

Bezeichnet f den Elektrodenabstand (Schlagweite), d den Elektrodendurchmesser, so gilt: mit wachsendem Werte von $f:d$ ist

zunächst FS identisch mit AS ,

dann FS „ „ GS ,

dann FS „ „ GSB bez. GSS .

Die Funkenspannung als Funktion der Schlagweite aufgefaßt, folgt dementsprechend nacheinander ganz verschiedenen Gesetzen, dazwischen liegen immer Übergangsgebiete mit großer Unregelmäßigkeit in der Funkenspannung.

Zwischen zwei Spitzen (symmetrische Versuchsanordnung)

ist die Anfangsspannung sehr klein und kommt für die Funkenbildung nur bei allerkleinsten Schlagweiten in Frage.¹⁾

In Tab. III sind die Messungsergebnisse für das Schlagweitenintervall 2—55 cm angegeben. Die Versuchsanordnung war die der Fig. 1, nur mit Spitzenelektroden statt der Kugeln. Die Messungen erfolgten derart, daß immer ohne Einschaltung eines Widerstandes in den primären Stromkreis unter langsamster Steigerung diejenige effektive Primärspannung festgestellt wurde, bei welcher *soeben* die genannten Grenzen (*GSG* oder *GSB*) erreicht waren, d. h. wann zum erstenmal *soeben* Funken auftraten. Die zugehörigen, in der Tabelle angegebenen wahren sekundären Spannungen sind gerechnet als: beobachtete effektive Primärspannungen mal 2601 mal 1,53.

Tabelle III.

Mittelwerte aus je fünf Einzelbestimmungen.

Entladung zwischen zwei Spitzen; 104 Wechsel in der Sekunde;
kein primärer Vorschaltwiderstand.

Elektrodenabstand f in cm	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
Grenzspannung von Glimmen (<i>GSG</i>) in Kilovolt	25,9	37,0	46,0	55,8	—	—	—	—	—	—
Grenzspannung von Büschelentladung (<i>GSB</i>) in Kilovolt	—	—	—	—	—	—	—	—	—	74,8
Funkenspannung FS in Kilovolt	25,9	37,0	46,0	55,8	61	67	71	76	87,2 bis 78,7	74,8 bis 84,4

Elektrodenabstand f in cm	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Grenzspannung von Glimmen (<i>GSG</i>) in Kilovolt	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Grenzspannung von Büschelentladung (<i>GSB</i>) in Kilovolt	89,7	114	139	165	186	209	233	255	276
Funkenspannung (FS) in Kilovolt	89,7 bis 91,5	114	139	165	186	209	233	255	276

1) Die Anfangsspannung nähert sich, wie dies in den eingangs angegebenen Interpolationsformeln zum Ausdruck kommt, für $f = \infty$ einem konstanten größten Grenzwerte; dieser liegt um so niedriger, je feiner die Spitzen sind. Selbst für sehr stumpfe Spitzen erreicht die größte Anfangsspannung (für $f = \infty$) höchstens 10 Kilovolt.

Die Angaben von Tab. III lassen folgendes erkennen: der eigentümliche Verlauf der *Funkenspannung* bei kleinen Schlagweiten (2—15 cm) erklärt sich, wie auch schon früher angegeben¹⁾, durch das Auftreten von Glimmentladung. Die *Unregelmäßigkeit* der Funkenspannung für $f = 5$ cm bis $f = 15$ cm wird dadurch veranlaßt, daß die Funkenbildung je nach Zufall einmal näher der Grenzspannung durch Glimmen, dann näher der der Büschelentladung erfolgt. Für große Schlagweiten ($f > 15$ cm) ist die Funkenspannung identisch mit der Grenzspannung der Büschelentladung (und zwar speziell überwiegend *positiver* Büschelentladung). *Letztere* Grenzspannung verläuft, als Funktion (Ordinate) der Schlagweite aufgefaßt, nahe geradlinig, zeigt aber doch auch wieder eine schwache Krümmung nach der Abszissen-(Schlagweiten-)achse hin.²⁾

In quantitativer Hinsicht ergibt sich, daß die erhaltene Funkenspannung zwischen Spitzen bei Wechselstrom von 104 Wechsel in der Sekunde mit den eingangs erwähnten, von anderer Seite gefundenen Spannungen *recht gut übereinstimmt*.

Hermesdorf S.-A., September 1906.

1) Vgl. die Anm. 2 in Ann. d. Phys. **19**, p. 205. 1906.

2) Sie schneidet die Schar der Kurven der Anfangsspannungen an verschieden großen Kugeln je im Punkte mit $f:d = 10,4$. Hieraus erhält man auf dem gleichen Wege wie früher (l. c. p. 205) von mir angegeben ist $3,90 \cdot f + 8,4\sqrt{f}$ als Interpolationsformel für die in Rede stehende Grenzspannung, also auch für die Funkenspannung bei Schlagweiten zwischen 15 cm und 55 cm.

(Eingegangen 2. November 1906.)