**7. Zur Kenntnis der Funkenschallwellen
elektrischer Oszillationen;
von Max Toepler.**

Sichtbarmachung elektrischer Oszillationen mittels der Schlierenmethode. Die in der vorangehenden Arbeit angegebene Versuchsanordnung gestattet auch leicht, Schallwellen elektrischer Oszillationen zu beobachten und zu photographieren. Hierzu ist es nur nötig, die Kapazität C_3 nicht direkt, sondern unter Zwischenfügung einer nicht zu kleinen Selbstinduktionsspule S parallel zur Schallfunkenstrecke F' zu schalten (vgl. Fig. 1). Als Induktionsspulen dienten die schon oft in früheren Arbeiten benutzten¹⁾, welche aus starken Kupferdrähten, auf große Glasglocken gewickelt, bestehen. Man erhält so Photogramme, wie die in vorangehender Notiz wiedergegebenen.

Es war speziell:

bei Phot. 3 u. 4 Kap. $C_3 = 31\,100$ cm, $S = 90\,500$ cm, Bildvergröß. 1,51,
bei Phot. 5 Kap. $C_3 = 31\,100$ cm, $S = 227\,000$ cm, Bildvergröß. 1,51.

Man kann auf solchen Bildern immer wieder scharf unterscheiden:

1. Die Hauptwelle (Initialwelle).²⁾

1) M. Toepler, Wied. Ann. **66**, p. 1073. 1898.

2) Für objektive Beobachtungen des hierzu auf eine Mattglasscheibe entworfenen Bildes durch mehrere Personen kann es zweckmäßig sein, die Hauptwelle etwas zu verstärken, am einfachsten durch Parallelschaltung *ohne* Selbstinduktion einer weiteren Leidener Flasche C_5 zur Funkenstrecke F' , wie in Fig. 1 angedeutet ist.

Fig. 1.

2. Eine ganze Reihe weiterer kleinerer Wellen.

3. Das Schlierenbild der heißen Gase des Funkenkanales F , falls dieses nicht so klein ist, daß es durch die Elektroden verdeckt wird.

Die relative Intensität der einzelnen Bildteile ist die in Fig. 2 skizzierte:

A Initialwelle, sehr stark.

$a, b, c, d \dots$ Schwingungswellen von abnehmender Intensität.

B Oberfläche des Funkenkanales.

C Ort des Zentrums der Wellen.

Fig. 2.

Durch Veränderung der Kapazität C_3 und der Selbstinduktion S kann man natürlich Wellen der verschiedensten Schwingungsdauer herstellen. Man erhält so leicht Bilder, welche (Vergrößerung zu 1,5 angenommen) Schwingungswellen von 1 cm bis 0,5 mm Abstand zeigen, entsprechend etwa elektrischen Schwingungen von $5 \cdot 10^4$ bis 10^6 Halbschwingungen in der Sekunde.

Der Funken F . Der gesamte Strömungsprozeß im Funkenkanale F läßt sich als Superposition von drei einzelnen Strömungen auffassen (vgl. die Kurven 1, 2 und 3 in Fig. 3).

1. Ist an den Elektroden von F die Anfangsspannung erreicht, so bricht die Entladung aus. Es entsteht ein *Initialfunken*. Durch diesen gleichen sich diejenigen Elektrizitäts-

mengen aus, welche auf den Elektroden und ihrer Nachbarschaft zum fast selbstinduktionslosen und widerstandslosen Einströmen bereit liegen.

2. Nach Aufreißen des Funkenkanales durch den Initialfunken setzt sich die in C_3 aufgespeicherte, durch die Selbstinduktion S im Zuleitungskreise zunächst aufgehaltene Elektrizitätsmenge in Bewegung. Dem Initialfunken folgt eine durch die Selbstinduktion geregelte elektrische Schwingung im Kreise $C_3 FS$.

Fig. 3.

3. Zugleich kommt aber auch die in $C_1 C_2$ aufgesammelte Elektrizität im Stromkreise $C_1 W C_2 F$ ins Fließen. Diese Strömung ist zunächst *schwach*, reguliert durch den großen Ohmschen Widerstand des Halbleiterstabes W . Mit Ausbruch und Anwachsen der Gleitbüschel von p_1 und p_2 auf letzterem steigt sie aber an, um plötzlich bei Ausbruch des Gleitfunken zwischen p_1 und p_2 auf einen sehr großen Wert zu springen. Alles noch folgende interessiert uns nicht weiter, da der Gleitfunken als Beleuchtungsfunken für F dient, das Schlierenbild also nur die Vorgänge bis zum Ausbruche des Gleitfunken kontrollieren läßt.¹⁾

1) Bildervervielfältigungen nach Art der von E. Mach (Wiener Akad.-Ber. 98. IIa. p. 1336. 1889) erhaltenen durch eventuelle Oszillationen im Kreise $C_1 W C_2 F$ wurden nicht beobachtet.

Im großen und ganzen läßt sich der Stromstärkenverlauf der drei Komponenten auch quantitativ überblicken.

1. Für den Initialfunken werden die von mir (Ann. d. Phys. 21. p. 220. 1906) angestellten Schätzungen gelten. Seine Dauer beträgt etwa 10^{-7} sec, seine Stromstärke hängt von der Elektrodenkapazität ab.

2. Die Schwingung im Kreise $C_3 SF$ ist eine *wenig gedämpfte*, da der Widerstand des Kreises klein ist. Die Schwingungsdauer ist also $T = \pi \sqrt{C_3 \cdot S}$ zu rechnen, die Stromstärkenamplitude kommt der starker Initialfunken etwa gleich.

3. Bezüglich des dritten Anteiles (Strömung $C_1 W C_2 F$) genügt es, zu wissen, daß diese Strömung bis unmittelbar an den Ausbruch des Beleuchtungsfunkens (Gleitfunkens) heran unwesentlich klein ist, also auf das Schlierenbild wohl keinen Einfluß haben kann.

Die Wirkung des soeben geschilderten Strömungsvorganges im Entladungsraume ist folgende:

Der *Initialfunken* reißt einen Funkenkanal auf — die Ionisation veranlaßt Temperatursteigerung, diese Drucksteigerung. Die Oberflächenteile des Kanales nehmen hierbei in kürzester Zeit sehr große Geschwindigkeiten senkrecht zum Funkenkanale an. Sinkt beim Erlöschen des Initialfunkens diese Verbreitungsgeschwindigkeit unter die Schallgeschwindigkeit, so löst sich vom Funkenkanale eine scharf begrenzte Schallwelle ab. Dies gibt das *Schlierenbild A*.

Durch den nur noch langsam an Breite wachsenden Entladungskanal finden dann die in *Fig. 3* mit 2 bezeichneten *Schwingungen* statt. Bei jeder derselben erfährt der Kanal ruckweise eine Erweiterung. Erfolgt hierbei die Gasbewegung an der Kanaloberfläche mit Überschallgeschwindigkeit, so löst sich bei jeder Stromamplitude eine scharfe Schallwelle vom Entladungskanale ab. Dadurch entstehen die *Schlierenbilder a, b, c usw.*

Die *Stelle B* zeigt die *Oberfläche des Funkenkanales* im Augenblicke der Beleuchtung durch den Gleitfunken.

Daß es wirklich die Oberfläche des Funkenkanales ist, von welcher die Schallwellen der einzelnen Schwingungen ausgehen, erkennt man leicht daran, daß die dem Kanale näheren

Wellen, welche ihn also erst kürzlich verlassen haben, dieselben Unregelmäßigkeiten, Ausbuchtungen oder dergleichen zeigen, wie die Kanaloberfläche. Da der Ausgangsort der Wellen keine konstante Lage hat und da ferner, wie weiterhin noch eingehender behandelt ist, ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit von ihrer Intensität abhängt, also keine Konstante ist, so kann man nicht aus dem räumlichen Abstände zweier Wellen durch Divisionen durch die normale Schallgeschwindigkeit auf ihren Zeitabstand, d. h. auf die Dauer der elektrischen Schwingungen rückschließen!

In nachstehenden Tabellen (p. 1056) sind die Versuchsgrößen und die Dimensionen der Einzelteile für eine Reihe von Photogrammen zusammengestellt. Die Photogramme sind hierbei geordnet nach der Größe des Radius der Initialwelle.

Mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Funkenschallwellen. Photogramme der vorliegenden Art gestatten leicht die von E. Mach¹⁾ gefundene Eigentümlichkeit von Funkenschallwellen, überrnormale Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu besitzen, eingehender zu verfolgen.

Läßt das Photogramm alle einzelnen Schwingungen von der Welle a bis zum Kanale B deutlich erkennen, so daß man die Zahl n der stattgehabten Schwingungen (n ganze Zahl und Bruch) sozusagen ablesen kann, so beträgt die Zeit zwischen Initialfunken (Welle A) und beleuchtendem Gleitfunken $(\frac{1}{2} + n) \cdot T$. Bedeutet w die Bildvergrößerung und $\overline{AC}$ den Radius der Welle A , so ist die mittlere Geschwindigkeit V_A der Welle A :

$$V_A = \frac{\overline{AC}}{w \cdot (\frac{1}{2} + n) \cdot T}.$$

Meist jedoch lassen sich leider die Schwingungswellen nicht bis an den Funkenkanal heran genügend sicher erkennen. Man kann dann n indirekt finden. Wie ein Blick auf die Tabellen lehrt, ist der Abstand benachbarter Schwingungswellenbilder (a bis b , b bis c usw.) fast konstant. Dann ist n gleich dem Abstände von a bis B dividiert durch den mitt-

1) E. Mach, Wiener Akad.-Ber. 75. II. p. 101. 1877; 77. II. p. 3 und p. 819. 1878.

Tabelle 1.

Tabelle 2.

Tabelle 3.

Kapazität C_s in cm		9980		31 100		31 100	
Selbstinduktionskoeffizient S in cm		227 000		90 500		90 500	
$T = \pi \sqrt{C_s \cdot S}$ in sec		$4,95 \cdot 10^{-6}$		$5,56 \cdot 10^{-6}$		$5,56 \cdot 10^{-6}$	
Kapazität C_s in cm		nicht angeschaltet		nicht angeschaltet		1400	
Bildvergrößerung w		1,45		1,51		1,51	
Abstand A bis a in mm		3,9	3,9	3,9	4,3	4,4	4,5
" " " b "		6,0	6,2	6,0	7,0	7,1	7,2
" " " c "		8,2	8,4	8,3	9,6	9,6	9,8
" " " d "		10,4	10,6	10,6	11,9	12,1	12,3
" " " e "		12,7	12,8	12,9	13,3	14,7	14,7
" " " f "					15,1	17,5	17,5
" " " g "					17,6	20,4	20,4
" " " h "					20,0	23,3	23,3
" " " i "					22,5		
" " " k "					24,6		
" " " l "							
" " " m "							
" " " B "		12,7	15,0	17,8	24,0	26,8	15,9
" " " C "		15,2	17,6	21,0	26,9	30,0	21,1
Wahrer Radius d. Hauptwelle in mm		10,5	12,1	14,5	18,6	20,7	14,0
n_1		4	4	4	4	9	4
λ_1 in mm		2,20	2,23	2,25	2,23	2,32	2,58
n		4,00	4,98	6,18	8,79	10,0	4,50
V_A in m/sec		471	447	438	403	398	503
W_A in m/sec		390	381	384	364	363	429
							14,4
							18,1
							5
							2,60
							7
							2,67
							7,39
							14,60
							403
							590
							462
							22,6
							3
							7
							2,71
							8,34
							461
							403

leren Abstand λ_1 der n_1 ausgemessenen Wellen; natürlich erhält man n um so genauer, je mehr n_1 dem n nahe kommt.

Die Wellen A und a sind aber nicht vom Zentrum C , sondern von der Oberfläche des Funkenkanals ausgesandt; ihre *wahre* mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist in allen Fällen eine wesentlich kleinere, als die unter V_A angegebene mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schlierenbilder A vom Zentrum aus gerechnet. Da, wie die Tabellen zeigen, der Abstand von A bis a mit wachsender Wellengröße nur wenig anwächst, so folgt zunächst, daß die wahre Geschwindigkeit, mit welcher die Welle A im Raume fortschreitet, nur wenig größer ist, als diejenige von Welle a . Ferner folgt hieraus, daß der kleinste Wert des Abstandes A von a vermindert um $\lambda_1:2$ recht angenähert gleich dem Radius des Initialfunkenkanals zur Zeit der Ablösung der Welle A von ihm sein wird. Von der Schallwelle A ist also die Strecke $\overline{AC} - \overline{Aa} + \lambda_{1/2}$ in der Zeit $(n + \frac{1}{2})T$ wirklich durchlaufen worden; der Quotient gibt die mittlere wahre Geschwindigkeit W_A .

Da alle Messungen bei $20-22^\circ$ C. Zimmertemperatur angestellt sind, betrug die normale Schallgeschwindigkeit 343 m pro Sekunde. Die erhaltenen Geschwindigkeiten W_A sind also immer noch beträchtlich größer als die normalen.

Sowohl V_A als auch W_A nehmen bei gleicher Versuchsanordnung ab mit der Größe der Wellen, also mit der Wellenintensität.

Ferner lassen die Tabellenangaben auch erkennen, daß bei gleicher Wellengröße den stärkeren Initialfunken größere Wellengeschwindigkeit zukommt. Es war ohne Anschaltung von C_3 und C_5 die Elektrodenkapazität — welche ein rohes Maß gibt für die Stärke des Initialfunken — auf 200 cm zu schätzen, bei Anschaltung der kleineren Kapazität C_3 (entsprechend Tab. 1) auf 300 cm, bei der größeren Kapazität C_5 (entsprechend Tab. 2) auf 400 cm, und schließlich bei Zuschalten von $C_6 = 1400$ cm (entsprechend Tab. 3) auf 1800 cm.

Die Geschwindigkeit der schwächsten Wellen der Photogramme kommt der normalen schon merklich nahe. Die direkte Beobachtung mittels Fernrohr läßt aber noch *wesent-*

lich schwächere Wellen erkennen und messen, wie dies in einer vorangegangenen Abhandlung geschehen ist.¹⁾ Bei letzteren Wellen dürfte die Geschwindigkeit die normale um höchstens 3 Proz. überschreiten. Da bei sehr schwachen Initialfunken auch der Funkenkanal, somit auch die Unsicherheit des Ausgangsortes der Wellen klein ist, so erscheint es unbedenklich, ihre Schallwellen als Zeitmaß zu benutzen, wenn man mit ebengenannter Unsicherheit zufrieden ist.

Dresden, d. 20. Oktober 1908, Physik. Institut d. Techn. Hochschule.

1) Vgl. M. Toepler, Ann. d. Phys. 21. p. 211. 1906. Dasselbst ist in Fig. 9 ein Kunstgriff angegeben, um auch bei starken Funken *F* doch schwache Schallwellen zur Zeitmessung zu erzeugen.

(Eingegangen 21. Oktober 1908.)