8. *Die Dämpfung elektrischer Schwingungen durch eine Funkenstrecke; von K. Simons.*

§ 1. In der Telegraphie vermittelt elektrischer Wellen ist einer der größten Fortschritte seiner Zeit durch Einführung des möglichst ungedämpften elektrischen Schwingungskreises durch Braun gemacht worden. Der geschlossene Kreis dient als Energiereservoir für die Strahlung des Luftleiters, der gedämpft sein muß, sollen Fernwirkungen erzielt werden. Verluste durch Ohmschen Widerstand, Strahlung und dielektrische Hysteresis sind auch in dem geschlossenen Kreise nicht ganz zu vermeiden, vor allem liegt aber auch in der erregenden Funkenstrecke eine nicht zu umgehende Dämpfung. Bisher liegen nur vereinzelte Angaben über die Größe dieser Dämpfung vor. So gibt Bjerknes¹⁾ nach Resonanzversuchen den einer Funkenstrecke entsprechenden Widerstand auf 11 Ohm an, während Braun ihn auf einige Zehntel Ohm schätzt, wie Wien²⁾ mitteilt. Es ist ja aber selbstverständlich, daß sich nicht für alle Funkenstrecken der gleiche Widerstand ergibt, jene Angaben sollen nur zur Bezeichnung der Größenordnung dienen. Der Widerstand wird von der Funkenlänge und der Stromdichte abhängig sein. Letztere ist aber, abgesehen von dem aufladenden Induktorium, eine Funktion der Kapazität und des im Kreise vorhandenen Ohmschen Widerstandes, zugleich auch der Funkenlänge selbst, da diese das Potential, zu dem die Kapazität aufgeladen wird, bestimmt. Einen weiteren Einfluß wird die Beschaffenheit der Luft und vielleicht auch das Elektrodenmaterial haben.

§ 2. Im folgenden soll nun nicht eine allgemeine Formel für den Widerstand einer Funkenstrecke gesucht werden, sondern nur eine Methode nebst einigen danach angestellten Messungen wiedergegeben werden, durch die eine Funkenstrecke direkt durch den Ohmschen Widerstand substituiert wird. Es werde ein Schwingungskreis aus Selbstinduktion und Kapazität

1) V. Bjerknes, Wied. Ann. 55. p. 120. 1895.

2) M. Wien, Ann. d. Phys. 8. p. 686. 1902.

gebildet und in ihm zwei Funkenstrecken angeordnet. Von diesen dient die eine zur Erregung der Schwingungen, wir wollen sie als Entlade-Funkenstrecke (E.-F.-S.) bezeichnen, die zweite nur zur Dämpfung, sie heiße die Dämpfungs-Funkenstrecke (D.-F.-S.). Dies wird durch die nebenstehende Schaltung erreicht (vgl. Fig. 1).

Beide Seiten der D.-F.-S. werden durch Drosselspulen von dem einen Pol des Induktoriums aufgeladen, so daß bis zur eintretenden Entladung keine Spannungsdifferenz an ihr herrscht. Oder zieht man die E.-F.-S. so weit auseinander, daß eine Entladung nicht mehr stattfindet, so treten auch an der D.-F.-S. unter keinen Umständen Funken auf. Im Momente der Entladung aber suchen sich die raschen Schwingungen durch die D.-F.-S. ihren Weg, die Wellenlänge ist nur durch die Kapazität und Selbstinduktion des Kreises gegeben, da die Welle, die auch durch die Drosselspule bestimmt ist, von sehr großer Länge und sehr geringer Intensität ist. Wir erhalten so eine variable Funkenstrecke, die auf das Entladungspotential ohne Einfluß ist und direkt durch Ohmschen Widerstand ersetzt werden kann.

Fig. 1.

Die entstehenden Schwingungen wurden nun durch einen Wellenmesser der Gesellschaft für Funkentelegraphie beobachtet. Es ist dies ein möglichst ungedämpfter Schwingungskreis mit variabler Kapazität, der mit dem zu untersuchenden System lose gekoppelt wird. Eine Windung in ihm aus kräftigem Kupfer induziert Ströme in einem weiteren Kreise, bestehend aus wenigen Windungen und Ohmschen Widerstand. Die Erwärmung dieses Widerstandes, zu der nur ein sehr geringer Energieaufwand im Vergleich zu der Energie des Hauptschwingungskreises erforderlich ist, wird durch ein Luftthermometer gemessen. Der Ausschlag des Thermometers gibt ein Maß für die Amplitude der Welle an, welche der konstanten Selbstinduktion und der gerade eingestellten Kapazität des Wellenmessers entspricht. Wegen genauerer Angaben und Theorie des Wellenmessers muß auf die besonderen Veröffent-

lichungen über ihn hingewiesen werden.¹⁾ Zunächst wurde mittels dieses Apparates die Welle bei kurzgeschlossener D.-F.-S gemessen, alsdann diejenigen bei verschiedener Länge der D.-F.-S., während alles übrige E.-F.-S., Induktoriumstrom, Kuppelung des Wellenmessers konstant gehalten wurde. Schließlich wurde noch die Welle bestimmt bei Ersetzung der D.-F.-S. durch passende Widerstände ohne Selbstinduktion. Aus den Kurven der Wellen geht direkt hervor, ob die Forderung vernachlässigbarer Selbstinduktion durch die gewählten Widerstände erfüllt wurde.

§ 3. Als Widerstandsmaterial wurde Graphit bez. Bogenlampenkohle gewählt, die den zu stellenden Bedingungen wohl genügen. Die Erwärmung konnte in solchen Grenzen gehalten werden, daß eine größere Veränderung durch die steigende Temperatur ausgeschlossen schien, außerdem wurde der Widerstand direkt nach der Messung bestimmt. Daß dieser Widerstand praktisch derselbe sei für rasche Schwingungen wie für den Gleichstrom der Wheatstonebrücke, geht aus folgendem hervor. Lord Rayleigh¹⁾ entwickelt den Widerstand eines geraden zylindrischen Leiters, um den es sich handelt, allgemein in der Form:

$$R' = R \left(1 + \frac{1}{12} \cdot p^2 \mu^2 \alpha^2 - \frac{1}{180} \cdot p^4 \mu^4 \alpha^4 + \dots \right).$$

Hierin bedeutet R' den Widerstand für rasche Schwingungen, R den Ohmschen, p die Anzahl der ganzen Schwingungen pro Sekunde, μ den Permeabilitätskoeffizienten, α die Leitfähigkeit. Nun war der spezifische Widerstand des benutzten Graphits gleich 34 600 000 (C.G.S.) gegenüber 1650 bei Kupfer, so daß für die erste der später wiedergegebenen Messungen sich folgendes ergibt:

$$p = \frac{3 \cdot 10^{10}}{5 \cdot 10^4} = 6 \cdot 10^5, \quad \mu = 1, \quad \alpha = \frac{1}{3,46 \cdot 10^7},$$

$$R' = R \cdot \left(1 + \frac{1}{12} \cdot \frac{36 \cdot 10^{10}}{12 \cdot 10^{14}} \dots \right) = R \left(1 + \frac{1}{40000} - \dots \right).$$

Widerstände aus Graphit und Bogenlampenkohle wurden also an Stelle der Dämpfungsfunkenstrecke eingesetzt und aus den Kurven der so erhaltenen Wellen mit verschiedener

1) J. Dönitz, Elektrotechn. Zeitschr. 24. p. 920. 1903.

1) Lord Rayleigh, Phil. Mag. (5) 21. p. 391. 1886.

Dämpfung eine neue Kurve gezeichnet, welche die maximalen Thermometerausschläge als Funktion des zugeschalteten Widerstandes darstellt. Aus den Kurven der durch die Funkenstrecke gedämpften Wellen wurden schließlich ebenfalls die

Fig. 2.

maximalen Werte herausgegriffen und der ihnen entsprechende Ohmsche Widerstand aus jener Kurve abgelesen.

§ 4. Dies sei an verschiedenen Beispielen erläutert. Es wurde ein Ölkondensator von 0,0015 Mikrof. Kapazität gewählt

und mit einer Selbstinduktion zu einem Kreise vereinigt, so daß sich $\lambda_{\max.} = 508$ m als Wellenlänge ergab. Die Entladefunkkenstrecke betrug $2\frac{1}{2}$, die D.-F.-S. bis 2 mm. Die Funken waren bläulichweiß und knallend. Die erhaltenen Kurven für

Fig. 3.

kurzgeschlossene Funkenstrecke und 1 und $1\frac{1}{2}$ mm gibt Fig. 2; bei 2 mm Funkenstrecke wurden die Thermometeraussschläge unruhig, hervorgerufen durch zeitweises Aussetzen der Funken. Die Kurven der Wellen bei eingeschaltetem Ohmschen Wider-

stand (Graphitstäbchen) zeigt Fig. 3. Die Maximalwerte als Funktion des Widerstandes gibt Fig. 4. Als Widerstand der

Fig. 4.

Funkenstrecke von 1 mm ergab sich $2,2 \Omega$, der $1\frac{1}{2}$ mm Funkenstrecke $3,2 \Omega$.

Die Messungen waren:

Wellenlänge in m	Funkenstrecke			Substituierter Widerstand				
	kurzgeschl.	1 mm	$1\frac{1}{2}$ mm	$3,1 \Omega$	$6,1 \Omega$	8Ω	$13,7 \Omega$	$3,0 \Omega$
400	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	—	—	$\frac{3}{4}$
420	$1\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	—	—	—	1
440	2	1	$1\frac{1}{2}$	2	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	2
460	$4\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{2}$	—	$3\frac{1}{2}$	3	3	—	$3\frac{1}{2}$
470	7	$4\frac{1}{2}$	4	6	6	—	—	6
480	12	8	7	$8\frac{1}{2}$	8	8	6	9
490	$19\frac{1}{2}$	16	14	16	13	$12\frac{1}{2}$	8	$15\frac{1}{2}$
500	39	28	24	23	$17\frac{1}{2}$	$16\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$	24
508	56	34	28	—	—	—	—	—
510	52	32	27	26	$19\frac{1}{2}$	$17\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$	27
520	28	23	$20\frac{1}{2}$	22	$16\frac{1}{2}$	16	$8\frac{1}{2}$	22
530	15	11	9	$12\frac{1}{2}$	—	11	$7\frac{1}{2}$	$12\frac{1}{2}$
540	9	$6\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{2}$	8	$7\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	6	8
550	6	$4\frac{1}{2}$	—	6	—	—	—	—
560	4	$3\frac{1}{2}$	2	4	4	4	$3\frac{1}{2}$	4
570	3	$2\frac{1}{2}$	—	—	—	—	—	—
580	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	2	2	2	$1\frac{1}{2}$	2

Die Angaben sind gemacht in den willkürlichen Einheiten der Thermometerskala.

Die Funkenstrecken bestanden bei diesen Versuchen aus Zinkzylindern von 10 mm Durchmesser mit aufgesetzten Halbkugeln.

§ 5. Es wurde nun bei gleichen Elektroden ein bläulicher Funken untersucht, den man in der Funkentelegraphie als inaktiv bezeichnen würde. Im Kreise befand sich eine Kapazität von 0,00188 Mikrofarad und zwar eine Leydener

Fig. 5.

Flasche mit Stanniolbelag, und eine Selbstinduktion, welche die Wellenlänge $\lambda_{\max.}$ auf 790 m brachte. Der Entladefunken war 3 mm lang, die Dämpfungsfunkens Strecke wurde von $\frac{1}{2}$ — $1\frac{1}{2}$ mm variiert. Die

Koppelung des Wellenmessers war eine andere, so daß die Thermometerausschläge nicht mit denen der vorigen Meßreihe verglichen werden können. Es seien nur die maximalen Amplituden angegeben (vgl. Fig. 5):

D.-Funkenstrecke kurzgeschl.,	$\lambda_{\max.} = 790$,	Thermometerausschlag = 34
„ $\frac{1}{2}$ mm lang,	$\lambda_{\max.} = 790$,	„ = 26
„ 1 „ „	$\lambda_{\max.} = 790$,	„ = 22
„ $1\frac{1}{2}$ „ „	$\lambda_{\max.} = 790$,	„ = 19
Substituiert. Widerst. = $3,2 \Omega$,	$\lambda_{\max.} = 790$,	„ = 25
„ „ = $5,2 \Omega$,	$\lambda_{\max.} = 790$,	„ = 21
„ „ = $12,3 \Omega$,	$\lambda_{\max.} = 790$,	„ = 12

Durch Interpolation ergibt sich hiernach der Widerstand der $\frac{1}{3}$ mm-Funkenstrecke = $2,7 \Omega$, der 1 mm langen = $4,6 \Omega$, der $1\frac{1}{2}$ mm langen = $6,5 \Omega$. Die Widerstände dieser Funken liegen also bei weitem höher als im vorigen Falle.

§ 6. Es sei noch der Widerstand einer Funkenstrecke wiedergegeben, die sich in einem Schwingungskreise befindet, wie er in der Telegraphie mittels elektrischer Wellen praktisch oft zur Anwendung kommt. Der Kreis wurde gebildet aus sechs Leydener Flaschen mit einer Kapazität von zu-

sammen 0,0101 Mikrof.¹⁾ und einer solchen Selbstinduktion, daß $\lambda_{\max.} = 405$ m betrug. Die Dämpfungsfunkkenstrecke wurde aus Zinkzylindern von $5\frac{1}{2}$ mm Durchmesser gebildet. Zur Substitution wurden Bogenlampenkohlen von 11 mm Durchmesser und 95 mm Länge gewählt, deren drei maximal hintereinander geschaltet 0,36 Ω Widerstand warm gemessen ergaben. Mit einem großen Funkeninduktorium und Turbinenunterbrecher betrieben ging die Entladung über beide Funken-

Fig. 6.

strecken, von denen die E.-F.-S. stets eine Länge von $15\frac{1}{2}$ mm hatte, doch nicht mehr ganz gleichmäßig vor sich, das Thermometer schwankte, und es wurden nur Mittelwerte erhalten. Die Maximalamplituden betrugen wieder (vgl. Fig. 6):

Bei Kurzschließung der Funkenstrecke und $\lambda_{\max.} = 405$:

	Thermometerausschlag
2 mm Funkenstrecke	72
4 „ „	60
6 „ „	55
10 „ „	50
12 „ „	48
14 „ „	43

Bei Substituierung eines Widerstandes

von 0,061 Ohm	Thermometerausschlag
„ 0,12 „	53
„ 0,24 „	46
„ 0,36 „	39
	34

1) Die Flaschen waren in den Laboratorien der Firma Siemens & Halske geeicht.

Eine 4 mm lange Funkenstrecke entspricht also hier erst einem Widerstand von 0,05 Ohm und eine 13 mm lange etwa 0,16 Ohm. Es ergibt sich somit, daß der von Braun angegebene Wert die richtige Größenordnung für die heutigen normalen Verhältnisse angibt. Im übrigen scheinen die Messungen zu zeigen

1. daß der Widerstand einer Funkenstrecke um so geringer ist, je größer die entladenen Elektrizitätsmengen sind, d. h. je weißer und knallender der Funke ist;

2: daß innerhalb der beobachteten Grenzen der Widerstand der Funkenstrecke ihrer Länge proportional wächst. Doch müssen genauere Angaben über diese Punkte, sowie den Einfluß aller in § 1 genannten Faktoren weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

§ 7. Wäre der Wellenmesser tatsächlich ein ungedämpftes System und wäre die Koppelung eine ideal lose, d. h. eine Rückwirkung nicht vorhanden, so müßten mit abnehmendem Widerstand im erregenden System zugleich mit dessen Schwingungsamplitude auch die Thermometerausschläge des Wellenmessers bei Resonanz ins Unendliche wachsen, während bei unendlichem eingeschalteten Widerstand der Ausschlag Null wäre. Man könnte in erster Annäherung die Kurve, welche die Abhängigkeit der Thermometerausschläge von dem eingeschalteten Widerstand darstellt, als Hyperbel auffassen; und tatsächlich zeigen die erhaltenen Kurven hyperbolischen Charakter. Alsdann könnte aus diesen Kurven der Widerstand berechnet werden, der den Verlusten im gegebenen System entspricht, und der in Wirklichkeit nicht Ohmscher Widerstand zu sein braucht, der bei einem geschlossenen Schwingungskreis vielmehr zum größten Teil in der E.-F.-S. liegen wird. Man sucht nur zu den als Hyperbeln aufgefaßten Kurven (Figg. 4—6) die negative Abszisse, in der die Asymptote an die Hyperbel zu ziehen ist und in der also der Thermometerausschlag unendlich werden würde. Dieser Widerstand berechnet sich im ersten Beispiel zu rund 3 Ohm, im zweiten zu 12, im letzten zu 0,34 Ohm. Diese Berechnung ist aber natürlich nur eine rohe Annäherung und auch aus dem Grunde nicht zulässig, weil durch Zuschaltung von Widerstand in den Schwingungskreis auch der Widerstand der Entladefunkenstrecke

sich ändert, es ist also die Größe, die berechnet werden soll, nicht in allen Messungen als Konstante enthalten. Da aber ein Maß für die Dämpfung irgend eines Schwingungsgebildes dringend notwendig ist, so wäre eine überschlägige Vergleichung doch vielleicht auf diesem Wege zu erreichen. Denn es läßt sich aussagen, daß von zwei Systemen dasjenige das gedämpftere ist, bei dem ein Einschalten des gleichen Widerstandes die maximale Amplitude, die zunächst bei beiden gleich groß anzunehmen ist, weniger herabzudrücken imstande ist.

Zum Schlusse sei es mir gestattet, der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie, in deren Laboratorien ich diese Messungen ausführen konnte, und ihrem Ingenieur Hrn. R. Schmidt für seine liebenswürdige Unterstützung bei den Messungen meinen Dank auszusprechen.

Charlottenburg, Techn. Hochschule, 19. Januar 1904.

(Eingegangen 1. Februar 1904.)