6. *Das Wirkungsgesetz des Wehnelt-Unterbrechers;* *von Hermann Th. Simon.*

1. Schaltet man in einen elektrischen Gleichstrom von nicht zu kleiner Spannung, z. B. derjenigen einer Lichtleitung eine (etwa mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte) elektrolytische Zelle ein, deren eine Elektrode gegen die andere sehr klein ist, so geht, wie schon Richarz¹⁾, sowie Koch und Wüllner²⁾ gezeigt haben, kein constanter Gleichstrom durch den Stromkreis, sondern es treten an der kleineren Elektrode Vorgänge auf, welche dem Strom einen intermittirenden Charakter verleihen. Auf diese Erscheinung gestützt, hat Hr. Wehnelt³⁾ einen interessanten und für die physikalische Technik wichtigen „elektrolytischen Stromunterbrecher“ construirt.

2. Ueber die *Eigenschaften des neuen Unterbrechers* hat Hr. Wehnelt selbst, haben Spiess und Wehnelt⁴⁾ und seitdem andere Beobachter⁵⁾ (freilich ohne die Wehnelt'schen Resultate wesentlich zu erweitern) eine Reihe von Beobachtungen angestellt, von denen das für die folgenden Untersuchungen wichtige hervorgehoben sei:

Die Anordnung fungirt als Unterbrecher sicher und dauernd nur dann, wenn die kleinere (am besten Platin-)Elektrode Anode ist. Die Zahl der Unterbrechungen nimmt mit der Selbstinduktion des Schliessungskreises ab, mit der Betriebsspannung zu, mit der Grösse der Anodenspitze ab. Die mittlere Stromstärke (gemessen an einem Hitzdrahtampèremeter) nimmt mit der Betriebsspannung zu, mit der Selbstinduction des

1) F. Richarz, Wied. Ann. **39**. p. 231. 1890; l. c. **47**. p. 581. 1892.

2) R. Koch u. A. Wüllner, Wied. Ann. **45**. p. 473 u. 759ff. 1892.

3) A. Wehnelt, Elektrotechn. Zeitschr. Heft **4**. 1899.

4) P. Spiess u. A. Wehnelt, Verh. der Deutsch. physik. Gesellsch. **1**. p. 53. 1899.

5) A. d'Arsonval, Compt. rend. **128**. p. 529. 1899; H. Pellat, l. c. p. 732. 815; P. Bary, l. c. p. 925; J. Carpentier, l. c. p. 987; H. Armagnat, l. c. p. 988.

Schliessungskreises ab, mit der Grösse der Spitzenoberfläche zu etc. Ferner haben Spiess und Wehnelt¹⁾ aus ihren Versuchen geschlossen, dass die Stromcurve, nach der sich die Unterbrechungen vollziehen, horizontale Stücke auf der Nulllinie aufweisen müsse, d. h. dass der Strom während jeder Periode einige Zeit ganz unterbrochen bleibt. Hervorzuheben bleibt noch eine Beobachtung von d'Arsonval²⁾, welcher fand, dass der Unterbrecher auch dann functionirt, wenn man ihn an eine Wechselstromleitung anschliesst, und dass auch dann die Entladungen im secundären Kreise eines mit dem Unterbrecher betriebenen Inductoriums nur in einem Sinne erfolgen. Endlich haben mehrere Beobachter³⁾ bemerkt, dass die Unterbrechungszahl eine Function der Temperatur ist. Doch liegen hierüber noch keine bestimmteren Daten vor.

3. *Ueber den physikalischen Vorgang, der bei dem neuen Unterbrecher die obengenannten complicirten Eigenschaften bestimmt*, haben Spiess und Wehnelt⁴⁾ — durch die Abhängigkeit der Erscheinung von der Selbstinduction des Schliessungskreises bestimmt — die Anschauung ausgesprochen, es bilde sich bei dem Vorgang eine Art von elektrolytischer (Polarisations-)Capacität C an der anodischen Spitze, welche mit der Selbstinduction L des Schliessungskreises ein elektrisch schwingendes System bilde von der Schwingungszeit $T = \pi\sqrt{LC}$. Sie berechnen unter dieser Annahme für einen Fall aus der beobachteten Schwingungszeit T und der gemessenen Selbstinduction L die Capacität an der Anodenspitze zu 17,2 Mikrofard und finden diese Grössenordnung im Einklang mit der Grössenordnung wirklich beobachteter Polarisationscapacitäten.

Da es mir nicht gelang, mir von dieser Vorstellung ein anschauliches Bild zu machen, so habe ich versucht, von einer anderen Auffassung her zum Ziele zu gelangen. Ich habe dieselbe an der Hand der Beobachtungen mathematisch formulirt und durch zahlreiche messende Versuche zu beweisen versucht.

Im Folgenden wird zunächst die Methode dieser Messungen beschrieben; dann werden einige qualitative und quantitative

1) P. Spiess u. A. Wehnelt, l. c. p. 54.

2) A. d'Arsonval, l. c.

3) J. Carpentier, l. c.; H. Armagnat, l. c.

4) P. Spiess u. A. Wehnelt, l. c.

Versuchsergebnisse angeführt, welche für die Aufstellung des hier mitgetheilten Wirkungsgesetzes des Wehnelt-Unterbrechers bestimmend waren; schliesslich wird dieses Wirkungsgesetz selbst abgeleitet, discutirt und an der Hand des Beobachtungsmaterials geprüft.

Wie ich nachträglich fand, wird meine Auffassung in erfreulicher Weise durch die Versuche und Ansichten gestützt, die Hr. Richarz¹⁾ über die Natur der an kleinen Platin-elektroden auftretenden Uebergangswiderstände mitgetheilt hat.

4. Die *Methode meiner Versuche* stützte sich auf die Beobachtung der Unterbrechungszeiten des Wehnelt-Unterbrechers unter den verschiedensten Versuchsbedingungen. Die Primärspule eines grösseren Inductoriums wurde mit dem Strome des Stromunterbrechers beschickt und die Anzahl der Funken gezählt, die in der Secunde zwischen den mit der Secundärspule verbundenen Spitzen einer vertical gestellten Funkenstrecke überschlügen. Diese Funkenzahl ist der Unterbrechungszeit gleich. Das Auszählen der Funken geschah folgendermaassen: Durch ein lichtstarkes photographisches Objectiv wurde auf einer photographischen Platte ein Funkenbild des überspringenden Funkens entworfen. Die photographische Platte war an dem Ende eines ca. $2\frac{1}{2}$ m langen schweren Pendels befestigt, welches mittels einer Arretirung immer von derselben Elongation aus losgelassen werden konnte, also immer mit derselben Geschwindigkeit durch den Ort seiner Ruhelage ging.

Die Platte bewegte sich so bei dem Versuche mit stets gleicher Geschwindigkeit senkrecht zu der Linie des Funkenbildes und registrirte durch die Zahl der Funkenbilder auf der Platte die Zahl der Unterbrechungen des Unterbrechers während des Vorbeiganges der Platte. Die Zeit dieses Vorbeiganges, d. h. die Geschwindigkeit der Plattenbewegung, ergab sich in folgender Weise: Bei jeder Versuchsreihe wurde einmal eine Aufnahme der Entladungen des Inductoriums auf der bewegten Platte gemacht, wenn eine der beiden Spitzen der Funkenstrecke auf einer elektromagnetisch bewegten Stimmgabel befestigt war. Die Ansatzstelle des Funkens an dieser

1) F. Richarz, Wied. Ann. **39**. p. 67—68 u. 201—235. 1890; l. c. **47**. p. 567—582. 1892; l. c. **63**. p. 261—267. 1897.

in der Funkenrichtung schwingenden Spitze bildete sich auf der Platte als Sinuslinie ab, welche direct als Zeitmarke dienen kann, sobald man die Schwingungszahl der Stimmgabel kennt. Die letztere wurde mittels des phonischen Rades von La Cour ermittelt und betrug 32,8 Schwingungen in der Secunde. Die Geschwindigkeit der Pendelbewegung durch die Gleichgewichtslage war so gewählt, dass 7 bis 8 ganze Schwingungen der Stimmgabel auf einer 12:9 Platte abgebildet wurden.

5. Ueber *die Genauigkeit der Methode* ist folgendes zu bemerken: Die Selbstinduction des Inductoriums hängt bekanntlich von seiner Belastung ab, d. h. von dem Widerstande der Funkenstrecke im Secundärkreise. Dieser Widerstand ist — worauf ich in einer besonderen Mittheilung zurückkommen werde — wesentlich durch den Bewegungszustand der die Funkenstrecke umhüllenden Luftsäule mitbestimmt. Daher werden bei einer offenen Funkenstrecke nicht zu vermeidende plötzliche Luftströmungen eine Fehlerquelle der Messungen bilden, die einige Zahlen der Tabellen ersichtlich entstellt. Ferner ist die Methode, wenn man immer mit derselben Pendelgeschwindigkeit beobachtet, naturgemäss um so ungenauer, je weniger Unterbrechungen der Unterbrecher macht. Denn es werden dann immer weniger Funken auf der Platte registriert und die Auszählung ist unsicherer. Immerhin zeigen die Tabellen höchst selten Fehler über 10 Proc. Im Mittel bleiben die Fehler weit unter 5 Proc.

6. Schon *qualitativ* gestattet die beschriebene Methode einige für die Beurtheilung der Wirkungsweise des Wehnelt-Unterbrechers *wichtige Beobachtungen*.

So schien es zunächst von Interesse, zu prüfen, ob der Wehnelt-Unterbrecher sowohl Oeffnungs- wie Schliessungsfunken, wie es nach der Spiess-Wehnelt'schen Auffassung zu erwarten wäre, liefert, oder ob er nur die einen und dann welche von beiden er ergiebt.

Es wurden zu dem Zwecke Funkenaufnahmen auf der bewegten Platte gemacht, einmal, wenn der Wehnelt-Unterbrecher, das andere Mal, wenn ein mit der Hand bewegter Quecksilbercontact die Unterbrechungen gab. Die Versuche zeigten durch die charakteristische Abbildung der leuchtenden Kathodenseite des Funkens, *dass es sich auch bei dem Wehnelt-*

Unterbrecher nur um Öffnungsfunken handelt. Weiter wurden die Funken aufgenommen, welche der mit Wechselstrom bis 180 Volt betriebene Wehnelt-Unterbrecher lieferte. Die Bilder zeigen, dass der Unterbrecher immer nur in *demjenigen Curventheile des Wechselstromes unterbricht, in der die Platinspitze Anode ist.* Nur wenn die Funkenstrecke ganz klein (2 cm) gewählt wird, erhält man auch im anderen Curventheile Funken bez. Büschel. Dann hat man es aber offenbar mit den Büschelentladungen zu thun, welche von den Schwankungen des sinusförmigen Wechselstromes herrühren. Die Unterbrechungen des Unterbrechers lagern sich über diese Erscheinung und zeigen sich auch wieder nur in dem einen Theile der Wechselstrom-curve, welcher die Platinspitze zur Anode macht.

7. Die *quantitativen Versuche wurden so angestellt*, dass jedesmal eine der Grössen, i = Stromstärke, gemessen am Hitzdrahtampèremeter, p = Anodenlänge, d = Anodendurchmesser, E = Betriebsspannung, f = Funkenlänge, t = Temperatur der Säure, variirt wurde, während die übrigen möglichst constant gehalten, bez. als Function der jeweiligen Variablen gemessen wurden. Der Einfluss der Säureconcentration wurde durch einen Vorversuch innerhalb der Grenzen, in denen sie durch den Unterbrecherbetrieb selbst geändert wird, als unwesentlich nachgewiesen. Die Selbstinduction eines Inductoriums lässt sich messbar nicht variiren. Die Abhängigkeit der Unterbrechungszahl von der Selbstinduction konnte nach dieser Methode daher nicht ermittelt werden.

Tabelle I.

$v = 70$ Volt, $p = 5,5$ mm, $d = 0,5$ mm, $i = 9$ Amp., r ist der Regulirungswiderstand, T die Periode der Unterbrechung.

Platten-Nr.	f	r	$T 10^5$	Δ	$\Delta \%$
46	10	2,9	305	+ 17	5,5
47	12	2,4	300	+ 12	4,00
48	14	1,9	286	— 2	0,68
49	16	1,5	286	— 2	0,68
50	18	0,88	286	— 2	0,68
51	20	0,03	270	— 18	3,00
52	21	—	286	— 2	0,68
			Mittel 288		

Tabelle II.

 $v = 140$ Volt, $p = 5,5$ mm, $d = 0,5$ mm, $i = 11,25$ Amp.

Platten-Nr.	f	r	$T \cdot 10^5$	Δ	$\Delta \%$
53	10	4,5	179	+ 8	4,5
54	12	3,4	163	— 8	4,5
55	14	2,1	140	— 31	22,0
56	16	1,0	140	— 31	22,0
57	18	2,7	163	— 8	4,5
58	20	2,4	179	+ 8	4,5
59	21	1,8	163	— 8	4,5
60	16	3,05	169	— 2	1,8
			Mittel 171		

Nach dem Platte 56 entsprechenden Versuche wurde die durch den dauernden Betrieb *heissgewordene Säure* durch kalte ersetzt. Die Zahlen der Tab. II. zeigen dementsprechend in Hinsicht auf die Temperatur der Säure, dass bei höherer Temperatur eine höhere Betriebsspannung dazu gehört, um die

Tabelle III.

 $i = 9$ Amp., $f = 15$, $d = 1$ mm.

Platten-Nr.	v	p	r	$T \cdot 10^5$	Δ	$\Delta \%$
135	80	5 mm	2,5	415	± 0	0
138	100	5	4,7	435	+ 20	5
141	120	5	6,6	397	— 18	5
144	140	5	7,6	415	± 0	0
			Mittel 415			
136	80	6	3,6	760	+ 84	11
139	100	6	5,5	677	+ 1	0,18
142	120	6	7,5	677	+ 1	0,18
145	140	6	8,6	590	— 86	13
			Mittel 676			
137 } 150 }	80	7	4,3 } 3,5 }	963	+ 78	8
140	100	7	6,3	795	— 80	10
143 } 148 }	120	7	8,9 } 7,5 }	913	+ 28	3
147	140	7	9,3	870	— 15	1,7
			Mittel 885			

gleiche Unterbrechungszahl hervorzurufen, wie bei tieferer. Das heisst also, dass T mit wachsender Temperatur wächst. Auf diese Thatsache wird weiter unten mit besonderen Versuchen zurückgekommen werden.

Die Tabellen I bis III enthalten die für die Aufstellung des Wirkungsgesetzes des Wehnelt-Unterbrechers bestimmende Thatsache, *dass mit ein und demselben Unterbrecher immer dieselbe Unterbrechungszahl erhalten wird, sobald immer dieselbe Stromstärke durch den Apparat geht.* Da es sich um die am Hitzdrahtampèremeter gemessene Stromstärke handelt, d. h. um

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt},$$

so heisst das:

Bei einem bestimmten Unterbrecher ist die zu einer Unterbrechung erforderliche Stromarbeit immer dieselbe.

8. Diese Thatsache, in Verbindung mit den unter 6. erhaltenen Resultaten, drängt zu der Auffassung, *dass es sich bei dem „elektrolytischen“ Unterbrecher nicht um eine elektrolytische, sondern um eine Wärmewirkung des Stromes handelt.* Der Vorgang ist offenbar folgender: Wenn man den Strom durch den Wehnelt'schen Unterbrecher schliesst, so wächst er wegen der vorhandenen Selbstinduction relativ langsam auf seinen Endwerth E/r an, wo E die Betriebsspannung, r der Widerstand des Stromkreises ist. Die Widerstände im metallischen Schliessungskreise sind relativ so klein, dass sie ausser Acht bleiben können. *Im Unterbrecher selbst wiederum findet der Strom einen wesentlichen Widerstand nur auf der Oberfläche der Platinspitze, da ihm überall sonst eine Bahn von relativ sehr grossem Querschnitt zur Verfügung steht, der beim Eintritt des Stromes in die anodische Spitze plötzlich auf die Grösse der Spitzenoberfläche beschränkt wird.* Somit wird auch die Entwicklung Joule'scher Wärme durch den Strom wesentlich auf die Spitzenoberfläche localisirt sein. Die Temperatur wird dort schnell wachsen, bis schliesslich eine Verdampfung über der ganzen Oberfläche einsetzt und den Stromdurchgang plötzlich unterbricht.¹⁾ Ist eine grössere Selbstinduction vorhanden,

1) Vgl. dazu F. Richarz, Wied. Ann. **39.** p. 81 ff. u. 232. 1890; l. c. **47.** p. 579 ff. 1892; l. c. **63.** p. 261 ff. 1897.

so bringt der Oeffnungsextrastrom die Leuchterscheinungen an der Anode hervor, wie sie gewöhnlich zu beobachten sind, während sie bei kleiner Selbstinduction fehlen. Sobald der Strom unterbrochen ist, tritt eine Abkühlung ein, der Dampf condensirt sich, der Strom wird schliesslich wieder geschlossen und der Vorgang beginnt von neuem.

9. *Diese qualitative Vorstellung lässt sich folgendermaassen quantitativ formuliren:* Wie erwähnt, hat man zwei Phasen jeder Unterbrechungsperiode zu unterscheiden, die erste vom Momente des Stromschlusses bis zur Unterbrechung (Zeitdauer T_1), die zweite vom Momente der Unterbrechung bis zum abermaligen Stromschluss (Zeitdauer T_2). Die Gesamtdauer einer Periode ist also:

$$(1) \quad T = T_1 + T_2.$$

Die Dauer T_1 der ersten Phase ergibt sich nach folgender Ueberlegung: Schliesst man eine Stromquelle von der Spannung E durch einen Leiterkreis vom Widerstande w und der Selbstinduction L , so ist bekanntlich die Stromstärke i in jedem Zeitpunkte t durch die Beziehung bestimmt:

$$(2) \quad i = \frac{E}{w} \left(1 - e^{-\frac{w}{L} t} \right),$$

wo e die Basis der natürlichen Logarithmen ist.

Für die Wirkungsweise des Unterbrechers kommt, wie gesagt wesentlich nur der Widerstand w des Unterbrechers selbst in Betracht. Derselbe kann der Oberfläche ω der Anode umgekehrt proportional gesetzt werden. Denn es ist schon erwähnt, dass er wesentlich aus dem Widerstande besteht, den die plötzliche Beschränkung des Leitungsquerschnittes auf die Grösse der Anodenoberfläche bedingt. Da der Widerstand einer Flüssigkeitssäule allgemein durch $w = \kappa l/q$ gegeben ist, wo l die Länge, q der Querschnitt der Säule, κ der specifische Widerstand der Flüssigkeit ist, so wird w überall sehr klein, wo der Querschnitt hinlänglich gross ist. Nur für eine kleine Strecke l an der Spitzenoberfläche wird w endlich $= \kappa l/\omega$. Ueber l wissen wir nichts. Doch ist es wahrscheinlich, dass es bei demselben Apparate als constant betrachtet werden kann. Da

sich während jeder Unterbrechung die Temperatur der Säure, d. h. also α periodisch ändert, so ist w offenbar eine Function der Stromstärke, d. h. hier der Zeit. Doch wird es für eine erste Annäherung statthaft sein, einen mittleren Werth von w als constant zu behandeln.¹⁾ Somit können wir setzen:

$$(3) \quad w = \frac{k}{\omega}.$$

Es wird also in unserem Falle i nach der Gleichung (2) wachsen, bis die von ihm an der Anodenoberfläche entwickelte Joule'sche Wärme so gross ist, dass dort eine Verdampfung und somit eine Stromunterbrechung eintritt. Die in der Zeit T_1 entwickelte Joule'sche Wärme ist:

$$W = 0,24 \int_0^{T_1} i^2 w \, dt.$$

Jedesmal, wenn dieses W einen bestimmten Werth c_1 erreicht, tritt, wie die Versuche unter 7. zeigen, die Verdampfung, d. h. die Unterbrechung ein. Somit ergibt sich der Ansatz:

$$(4) \quad 0,24 \int_0^{T_1} i^2 w \, dt = c_1.$$

Die Constante c_1 stellt sich der Ueberlegung als eine complicirte Function der Temperatur, des Druckes, der specifischen Wärme, der Verdampfungswärme und der Wärmeleitung der Flüssigkeit des Unterbrechers, ferner des Gewichtes, der Wärmeleitung, der specifischen Wärme des Anodenmaterials etc. dar. Langsame Flüssigkeitsströmungen, wie sie durch den Unterbrecherbetrieb eingeleitet werden, dürften für c_1 keine Bedeutung besitzen, da die Unterbrechungsvorgänge so schnell verlaufen, dass dagegen die Strömungsgeschwindigkeit nicht in Betracht kommt. Wesentlich scheinen dagegen die Wärmeigenschaften des an der Anode elektrolytisch abgeschiedenen Gases eine Rolle zu spielen, worauf weiter unten zurückgekommen wird. Zunächst aber genügt es, zu wissen, dass c_1 für ein und denselben Unterbrecher eine Constante ist, wie es die unter 7. angeführten Versuche zeigen.

1) Vgl. dazu F. Richarz, Wied. Ann. **39**. p. 81 ff. 1890; l. c. **47**. p. 573 ff. 1892.

Führt man aus (2)

$$i^2 = \frac{E^2}{w^2} \left(1 - 2e^{-\frac{w}{L}t} + e^{-\frac{2w}{L}t} \right)$$

in (3) ein, so erhält man schliesslich:

$$(5) \left\{ \begin{aligned} 0,24 w \int_0^{T_1} i^2 dt &= \frac{0,24 E^2}{w} \left\{ \int_0^{T_1} dt - 2 \int_0^{T_1} e^{-\frac{w}{L}t} dt + \int_0^{T_1} e^{-\frac{2w}{L}t} dt \right\} \\ &= \frac{0,24 E^2}{w} \left\{ \frac{\overbrace{t + 2 \frac{L}{w} e^{-\frac{w}{L}t} - \frac{L}{2w} e^{-\frac{2w}{L}t}}^{T_1}}{0} \right\} \\ &= \frac{0,24 E^2}{w} \left\{ T_1 + 2 \frac{L}{w} e^{-\frac{w}{L}T_1} - \frac{L}{2w} e^{-\frac{2w}{L}T_1} - \frac{2L}{w} + \frac{L}{2w} \right\} \\ &= \frac{0,24 E^2}{w} \left\{ T_1 - \frac{2L}{w} \left(1 - e^{-\frac{w}{L}T_1} \right) + \frac{L}{2w} \left(1 - e^{-\frac{2w}{L}T_1} \right) \right\} = c_1. \end{aligned} \right.$$

Für $t = L/w$ wird der Ausdruck $e^{-w/Lt}$ der Gleichung (2) = 1. Man nennt bekanntlich L/w die Zeitconstante. Dieselbe ist die Zeit, in welcher der Strom i zu $1 - 1/e = 0,65$ seines schliesslichen maximalen Werthes ansteigt. Die Zeitconstante ist praktisch meist eine kleine Zahl, d. h. die Curve von i steigt sehr steil zu dem Werthe $0,65 E/w$ an. Könnten wir in unserem Falle annehmen, dass die Zeit T_1 wesentlich grösser ist als L/w , d. h. könnten wir L/w gegen T_1 als klein setzen, so wären e^{-w/LT_1} und e^{-2w/LT_1} kleine Brüche, die neben 1 in der Gleichung (5) vernachlässigt werden könnten.

Der Sinn dieser Vernachlässigung geht aus nachstehender graphischer Darstellung (Fig. 1) am besten hervor. Die Curve $i^2 = f(t)$ zeigt das Anwachsen des Stromquadrates mit der Zeit. Nach der Zeit $t = (L/w)$ ist 0,65 des endlichen Werthes E^2/w^2 erreicht. Der vertical schraffierte Raum ist der Joule'schen Wärme proportional, die durch das über die Zeit L/w genommene Stromintegral entwickelt wird, während das durch die Ordinate T_1 T_1 abgegrenzte, schräg schraffierte Flächenstück die entsprechende, in der Zeit T_1 entwickelte Wärme darstellt. Können wir, wie in der Fig. 1, T_1 gross gegen L/w

setzen, so kommt das vertical schraffierte Flächenstück gegen das schräg schraffierte nicht in Betracht.

Die Messung der Selbstinduction des Primärkreises des von mir benutzten Inductoriums mittels Wechselstrom ergab, wenn die secundäre Spule durch eine Funkenstrecke geschlossen war, den Werth $4 \cdot 10^6$ cm. Der Widerstand des Stromkreises mit dem Unterbrecher war ca. 40 Ohm = $4 \cdot 10^{10}$ C.G.S. Er wurde durch Strom- und Spannungsmessung bestimmt und

Fig. 1.

zeigte sich stark von der Stromstärke abhängig, d. h. von der Erwärmung der Säure in der Umgebung der Anodenspitze. Er sinkt bei starkem Strome auf 10 bis 20 Ohm.¹⁾ Die Zeitconstante ist demnach von der Grössenordnung $4 \cdot 10^6 / 4 \cdot 10^{10}$ bis $4 \cdot 10^6 / 10^{10}$, d. h. $1/10\,000$ bis $4/10\,000$ Secunde. Da die Unterbrechungszeiten von der Grössenordnung $1/1000$ Sec. sind, so ist in der That die Voraussetzung der oben gemachten Vernachlässigung vollauf erfüllt.

Somit wird

$$0,24 \int_0^{T_1} i^2 dt = \frac{0,24 E^2}{w} \left(T_1 - \frac{3}{2} \frac{L}{w} \right) = c_1$$

oder

$$(6) \quad \begin{cases} T_1 = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + \frac{c_1 w}{0,24 E^2} \\ \quad = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + C_1 \frac{w}{E^2} \end{cases}$$

Mit Benutzung von Gleichung (3) wird daraus

$$(7) \quad T_1 = \frac{3}{2} \frac{L \omega}{k} + \frac{C_1 k}{\omega E^2}.$$

1) Vgl. dazu F. Richarz, Wied. Ann. 47. p. 575. 1892.

Die Zeitdauer T_2 der zweiten Phase des Unterbrechungsvorganges ist durch die Schnelligkeit bestimmt, mit der die an der Anode und ihrer Umgebung aufgespeicherte Wärme c_1 wieder verschwindet, also durch die Abkühlungsgeschwindigkeit der Anode und ihrer Umgebung. Dieselbe muss eine complicirte Function aller möglichen Wärmefactoren der Anode und ihrer Umgebung, sowie der Strömungsvorgänge in der Flüssigkeit des Unterbrechers sein. Auf ihre möglichen Eigenschaften soll hier nicht eingegangen werden. Denn für den vorliegenden Fall genügt es, sich klar zu machen, dass die Abkühlungszeit für ein und denselben Unterbrecher bei derselben Temperatur der Füllung immer dieselbe sein wird, was auch im übrigen für Versuchsbedingungen bestehen.

Für diesen praktisch wichtigsten Fall ist daher

$$(8) \quad T_2 = C_2$$

constant.

Wir erhalten endlich aus Gleichungen (1), (7) und (8)

$$(9) \quad T = T_1 + T_2 = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + C_1 \frac{v}{E^2} + C_2,$$

welche T als Function von L , w und E wiedergiebt.

Mit Benutzung von Gleichung (7) können wir auch schreiben

$$(10) \quad T = \frac{3}{2} \frac{L \omega}{k} + \frac{C_1 k}{\omega E^2} + C_2$$

und erhalten T als Function von L , E , ω .

10. Die *qualitative Discussion* dieser Gleichung zeigt in Uebereinstimmung mit den unter 2 angeführten Eigenschaften des Unterbrechers, dass die Unterbrechungszahl mit wachsender Betriebsspannung und wachsender Selbstinduction des Schliessungskreises ebenfalls wächst, mit zunehmendem Widerstande, d. h. mit abnehmender Grösse der Anodenoberfläche dagegen abnimmt. Mit wachsender Betriebsspannung nähert sie sich einem kleinsten Grenzwerte

$$A = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + C_2$$

asymptotisch. Dieser Grenzwert ist $\frac{3}{2}$ der Zeitconstante, vermehrt um die Constante C_2 der zweiten Unterbrechungsphase.

Er liegt also um so tiefer, d. h. man hat um so mehr Unterbrechungen, je kleiner L und je grösser w , d. h. je kleiner die Oberfläche der Anode ist. Ferner erhält man, wie die Gleichung (10) weiter zeigt, um so mehr Unterbrechungen, je kleiner C_2 ist. Von dieser Constante kann man soviel jedenfalls sagen, dass sie um so kleiner sein wird, je kälter die Flüssigkeit des Unterbrechers ist, denn um so schneller kühlt sich die Anode und die Dampfschicht ab. Da es praktisch auch aus anderen Gründen zweckmässig ist, die Temperatur der Flüssigkeit des Unterbrechers auf tieferer Temperatur constant zu erhalten, so habe ich folgende Einrichtung des Unterbrechers getroffen, die sich gut bewährt hat. (Vgl. Fig. 2.)

Ein verticales Bleirohr B von 3 cm Durchmesser und ca. 10 cm Höhe bildet die Kathode. Dasselbe ist unten durch einen eingeschraubten Hartgummi- oder Specksteindeckel F verschlossen, welcher als Führung für den in der Axe des Bleirohres stehenden Platinstift S dient. Es ist

Fig. 2.

Fig. 3.

zweckmässig diesen Stift regulirbar einzurichten, wie es bei den neueren, von der Firma Ernecke in Berlin in den Handel gebrachten Wehnelt-Unterbrechern geschieht.

Das Bleirohr B hat der Platinspitze gegenüber einen seitlichen Ansatz, der zu der Glasspirale eines Liebig'schen

Kühlers K führt. Das andere Ende desselben führt in ein 3 cm weites oben stark erweitertes Glasrohr R , welches in die obere Mündung des Bleirohres eingekittet ist. Der Liebig'sche Kühler wird mit der Wasserleitung verbunden. Beim Betriebe des Unterbrechers geräth die Füllung desselben in eine lebhafte Circulation, welche beständig gekühlte Säure an die Anode führt, während die erwärmte in dem Kühler ihre Wärme wieder abgibt.

Ueber die Stromstärke ergibt die Theorie folgendes: Die *Stromcurve* hat die in Fig. 3 wiedergegebene Form, wo der aufsteigende Ast nach der Gleichung (2)

$$i = \frac{E}{w} \left(1 - e^{-\frac{w}{L}t} \right)$$

in jedem Zeitpunkte bestimmt ist.

Die Stromstärke

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} i^2 dt},$$

wie sie *am Hitzdrahtinstrument* abgelesen wird (wo T_1 die Zeitdauer des Stromdurchganges bedeutet), lässt sich daraus in folgender Weise berechnen: Es ist zu bilden

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} \frac{E^2}{w^2} \left(1 - e^{-\frac{w}{L}t} \right)^2 dt}.$$

Die Integration ergibt nach Gleichung (4) unter Benutzung des dort Gesagten

$$12) \quad J = \sqrt{\frac{E^2}{w^2 T} \left(T_1 - \frac{3}{2} \frac{L}{w} \right)}.$$

Setzt man aus Gleichung (6)

$$T_1 = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + C_1 \frac{w}{E^2}$$

ein, so erhält man

$$(13) \quad J = \sqrt{\frac{C_1}{w T}},$$

woraus schliesslich mit Benutzung von Gleichung (9) wird

$$(14) \quad J = \sqrt{\frac{C_1}{\frac{3}{2} L + \frac{C_1 w^2}{E^2} + i_2 w}}.$$

Die am Hitzdrahtinstrumente angezeigte Stromstärke nimmt demnach mit wachsender Unterbrechungszeit und wachsendem Widerstande, d. h. kleiner werdender Anodenoberfläche rasch ab, mit wachsender Betriebsspannung schnell zu, mit wachsender Selbstinduction ab, ganz wie es die Versuche von Wehnelt¹⁾, Spiess und Wehnelt²⁾, sowie die in den Tabellen gegebenen Messungen zeigen.

Die am Hitzdrahtinstrument abgelesene Stromstärke

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} i dt},$$

ist bekanntlich die Stärke eines Gleichstromes, der in derselben Zeit dieselbe Erwärmung hervorruft wie der gemessene discontinuirliche Wechselstrom.

Bilden wir dementsprechend aus Gleichung (13) die in der Zeit einer Unterbrechungsperiode T entwickelte Wärme $J^2 w T$, so ergibt sich

$$J^2 w T = C_1,$$

eine Beziehung, die naturgemäss auf den unter 7. in den Tabellen I—III gewonnenen thatsächlichen Ausgangspunkt unserer theoretischen Betrachtungen zurückführt.

Nach Gleichung (13) lässt sich die Constante C_1 experimentell ermitteln. Setzt man in ihr

$$w = \frac{k}{\omega}, \text{ so wird } \frac{J T k}{\omega} = C_1.$$

1) A. Wehnelt, l. c.

2) P. Spiess u. A. Wehnelt, l. c.

Untersucht man die Unterbrechungszeiten eines Unterbrechers bei verschiedener Anodenoberfläche, aber gleichbleibender Stromstärke J , so ergibt die letzte Gleichung die Beziehung

$$\frac{T_1}{\omega_1} : \frac{T_2}{\omega_2} : \frac{T_3}{\omega_3} = C_1 : C_2 : C_3.$$

Für die oben in der Tabelle III mitgetheilten Versuche erhalten wir so

$$C_1 : C_2 : C_3 = \frac{415}{5,25} : \frac{676}{6,25} : \frac{885}{7,25} = 79 : 108 : 122.$$

Für die weitere Prüfung des Gesetzes sind die Gleichungen (12), (13), (13) von Bedeutung.

Die *maximale Stromstärke* J_{T_1} , die in dem Momente herrscht, wo der Strom unterbrochen wird, die also beim Inductorienbetrieb für die Funkenlänge maassgebend ist, ergibt sich, wenn man in die Gleichung

$$i = \frac{E}{w} \left(1 - e^{-\frac{L}{w} t} \right)$$

für t den Werth

$$T_1 = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + C_1 \frac{w}{E^2}$$

einführt.

$$(15) \quad \left\{ \begin{aligned} J_{T_1} &= \frac{E}{w} \left(1 - e^{-\frac{w}{L} \left(\frac{3}{2} \frac{L}{w} + C_1 \frac{w}{E^2} \right)} \right) \\ &= \frac{E}{w} \left(1 - e^{-\frac{3}{2} + \frac{C_1 w^2}{L E^2}} \right). \end{aligned} \right.$$

Je grösser E und je kleiner w , desto grösser wird J_{T_1} , desto kleiner wird aber auch das zweite Glied der Gleichung (14). J_{T_1} nähert sich daher mit wachsendem E asymptotisch dem Grenzwert

$$\frac{E}{w} \left(1 - \frac{1}{e^{3/2}} \right) = \frac{7}{9} \frac{E}{w} = \frac{7}{9} J_{\max},$$

wenn $J_{\max}$ der Strom ist, der schliesslich erreicht würde, wenn keine Unterbrechung einträte.

Es ergibt sich also aus dieser Discussion, dass das durch Gleichung (9) oder (10) aufgestellte Gesetz des Wehnelt-Unterbrechers qualitativ alle Beobachtungen vollständig und eindeutig wiedergibt.

11. *Quantitativ* lässt sich dasselbe mittels der oben beschriebenen Methode insoweit prüfen, als es die Abhängigkeit der Unterbrechungsperiode von w , bez. ω und E enthält. Da mir ein Unterbrecher mit regulirbarer Spitze erst seit kurzem zu Gebote steht, so musste ich zunächst die Prüfung auf die Abhängigkeit der Unterbrechungszeiten von der Betriebsspannung beschränken.

Für diesen Fall ist, wenn immer dasselbe Inductorium bei derselben Belastung benutzt wird, L eine Constante. Ebenso können wir w , wenn immer derselbe Unterbrecher bei möglichst derselben Temperatur der Füllung Verwendung findet, als solche betrachten.

Gleichung (9) wird dann:

$$(11) \quad T = A + \frac{B}{E^2},$$

wo

$$A = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + C_2 \quad \text{und} \quad B = C_1 w.$$

In Tab. IV und V sind zwei entsprechende Versuchsreihen wiedergegeben. Aus den Beobachtungen der T wurden nach Formel (11) zunächst die Constanten A , dann B berechnet. In der Columnne $T \cdot 10^5$ ber. sind dann die nach der Formel (11) berechneten Werthe für T enthalten.

Tabelle IV.

$$f = 15 \text{ cm}, \quad p = 5,5 \text{ mm}, \quad d = 0,8 \text{ mm},$$

$$A = 107 \cdot 10^{-5}, \quad B = 610000 \cdot 10^{-5}, \quad T \cdot 10^5 = 107 + \frac{610000}{E^2}.$$

Platten Nr.	v	$T \cdot 10^5$ beob. sec	$T \cdot 10^5$ ber. sec	A	A %
24	140	138	138	± 0	± 0
25	130	143	143	± 0	± 0
26	120	152	149	-3	-2
27	110	163	157	-6	-3,6
28	100	174	168	-6	-3,6
29	90	183	182	-1	-0,5
30	80	195	202	+7	+3,9
31	70	213	221	+8	+3,7
32	60	260	251	-9	-3,5
33	50	405	351	-54	-10
34	40	538	487	-51	-10

Tabelle V.

$$f = 20 \text{ cm}, \quad p = 5,5 \text{ mm}, \quad d = 0,8 \text{ mm},$$

$$A = 125 \cdot 10^{-5}, \quad B = 860000 \cdot 10^{-5}, \quad T \cdot 10^5 = 125 + \frac{860000}{E^2}.$$

Platten Nr.	v	$T \cdot 10^5$ beob. sec	$T \cdot 10^5$ ber. sec	Δ	$\Delta \%$
35	140	174	169	- 5	2,9
36	130	172	176	+ 4	2,3
37	120	186	185	- 1	0,5
38	110	192	196	+ 4	2,2
39	100	210	211	+ 1	0,5
40	90	238	231	- 7	3
41	80	265	259	- 6	2,3
42	80	305	300	- 5	1,6
43	60	352	364	+ 12	3,3

Die beiden Tabellen zeigen, dass die Theorie die Beobachtungen auch quantitativ mit grosser Genauigkeit wiedergiebt, insoweit die Abhängigkeit von der Betriebsspannung in Frage kommt.

12. Ueber die Abhängigkeit des Unterbrechungsvorganges von der Temperatur der Unterbrecherflüssigkeit habe ich eine Reihe von Versuchen gemacht, deren Zahlen ich aber nicht wiedergebe, da sie noch nicht klar genug die Verhältnisse übersehen lassen und da auch hier die Theorie noch keinen bestimmten Aufschluss giebt. Die Versuche erstrecken sich auf ein Temperaturbereich von $20 - 60^\circ$ und sind unter mannichfachster Variation der Versuchsbedingungen angestellt. Sie ergeben allgemein eine Zunahme der Unterbrechungszeiten mit der Temperatur, doch bisweilen so, dass dieser Zunahme zunächst eine geringe und langsame Abnahme auf einen Minimalwerth vorangeht, von dem aus dem höheren Werth dann um so schneller zugestrebt wird.

Es scheint nach diesem Verhalten, als ob sich zwei Temperatureinflüsse bei der Bestimmung der Unterbrechungszeiten entgegenwirken. Ein solches Verhalten wird auch durch die Theorie wahrscheinlich gemacht. Denn einmal vergrössert eine Temperaturzunahme die Leitfähigkeit der Säure, verkleinert also den Widerstand des Unterbrechers; ferner vermindert dieselbe die bis zur Verdampfung zuzuführende Wärme, d. h. die Constante C_1 des Apparates; beides Einflüsse, welche

die Unterbrechungszeit zu verkleinern streben. Andererseits aber vergrössert eine Temperaturzunahme der Flüssigkeit die Abkühlungszeit C_2 , ein Einfluss, der die Unterbrechungszeit wieder zu vergrössern trachtet. Ob dieses Zusammenwirken in der That so statt hat und ob der Temperatureinfluss in einfacher Weise in der Theorie berücksichtigt werden kann, muss weiteren Versuchen überlassen bleiben, mit denen ich beschäftigt bin.

Oberhalb der Temperatur 60^0 wurde die Wirkungsweise meist schon unsicher; der Unterbrecher versagt dann oft in derselben Weise, wie es Spiess und Wehnelt¹⁾ für den Fall beschreiben, dass man den Secundärkreis eines mit dem Unterbrecher betriebenen Inductoriums durch eine zu grosse Funkenstrecke übermässig belastet.

Mit diesen Thatsachen und den schon über die Constante C_2 gemachten Bemerkungen ist es schwer vereinbar, dass Carpentier²⁾ in der Erhöhung der Flüssigkeitstemperatur einen Vortheil gefunden haben kann, der ihn bestimmte, den Unterbrecher mit einer wärmeundurchlässigen Hülle zu umgeben.

Nach meinen Erfahrungen ist gerade das Gegentheil erwünscht und anzustreben. Ja ich halte eine der oben beschriebenen Unterbrecheranordnung mit Kühlung ähnliche Einrichtung sogar für dringend erforderlich, wenn es sich um den Dauerbetrieb des Unterbrechers handelt.

13. Von allen Fragen, die sich bisher bei der Beobachtung des Wehnelt-Unterbrechers aufdrängen, bleibt demnach nur noch die eine zu beantworten, *warum der Unterbrecher nur einseitig wirkt*, d. h. nur dann, wenn die kleinere Elektrode die Anode ist. Die vorstehend entwickelte Theorie lässt hierfür zunächst keinen Grund erkennen. Hier äussert sich zweifellos ein secundärer Einfluss der Elektrolyse. Man könnte denken, dass die grössere Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs unter den gewöhnlichen Betriebsbedingungen keine genügende Ansammlung von Joule'scher Wärme an der Elektrodenoberfläche hervorbringen könne, um ein so plötzliches Verdampfen hervor-

1) P. Spiess u. A. Wehnelt, l. c.

2) J. Carpentier, l. c.

zurufen, wie es für die Unterbrechungen nöthig ist. Dann müsste aber eine Erhöhung der Betriebsspannung schliesslich zum Ziele führen.

Ein Versuch, den ich mit 300 Volt machte, ergab in der That Unterbrechungen, doch wurde die Spitze sehr bald glühend und schmolz ab. Das Ergebniss widerspricht daher der oben ausgesprochenen Vermuthung.

Es lagert sich offenbar über die eigentliche Unterbrechungserscheinung eine secundäre Wirkung des elektrolytisch abgeschiedenen Wasserstoffs auf das Platin.

Dass es in der That allein der Wasserstoff ist, der die nach der Theorie auch im umgekehrten Sinne zu erwartende Unterbrechungserscheinung stört, beweisen die Versuche, die ich mit dem Wehnelt-Unterbrecher bei Füllung mit Zink- oder Kupfervitriol machte. In diesem Falle nämlich, wo kein Wasserstoff an der Platinkathode abgeschieden wird, wirkt der Unterbrecher ebensogut in dem einen, wie in dem anderen Sinne, nur dass die durch die Metallabscheidung rauhe Oberfläche die Regelmässigkeit der Erscheinung stört.

Um diese Wirkung des Wasserstoffs zu erklären, liegt es nahe, an die Diffusions- und Absorptionswirkungen zu denken, wie sie beim Platin und Wasserstoff schon mehrfach beobachtet sind. Wie ich sehe, haben auch die Herren Koch und Wüllner¹⁾, sowie Hr. Richarz²⁾ und andere bereits solche Wirkungen zur Erklärung gewisser Unregelmässigkeiten herangezogen, die sich ihnen bei der Untersuchung des Uebergangswiderstandes kleiner Platinelektroden in verdünnter Schwefelsäure zeigten. Die Entzündung des Wasserstoffs durch Platinmoor ist die bekannteste Erscheinung der Art. Ferner gehört folgender interessante Versuch von Bellati und Lussana³⁾ hierher: Ein Barometer wurde oben durch eine aufgesetzte Eisenplatte geschlossen und durch Aufkitten eines Glasringes ein Voltameter hergestellt, dessen Boden und gleichzeitig Kathode die Eisenplatte bildete. Wurde der Strom geschlossen, so fiel das Quecksilber im Barometer, indem der auf der oberen Seite

1) R. Koch u. A. Wüllner, Wied. Ann. **45**. p. 774. 1892.

2) F. Richarz, Wied. Ann. **47**. p. 582. 1892.

3) M. Bellati u. S. Lussana, Atti R. Ist. Veneto (7) **1**. p. 1173. 1890; Zeitschr. f. physik. Chem. (7) p. 229. 1891.

der Eisenplatte elektrolytisch entwickelte Wasserstoff in die Barometerleere diffundirte.¹⁾ Zur Erklärung heranzuziehen sein dürfte auch folgender Versuch von Planck, den er einmal in seiner Vorlesung mittheilte: In die Wand eines mit Wasserstoff gefüllten Glasballons war ein Platindraht eingeschmolzen. Wurde dieser Draht durch eine Bunsenflamme auf hoher Temperatur gehalten, so zeigte sich nach einiger Zeit, dass der Wasserstoff vollständig aus dem Ballon herausdiffundirt war. Auf Grund dieser Versuche hätte man sich den Vorgang so zu erklären, dass der an der heissen kathodischen Platinspitze abgeschiedene Wasserstoff sehr energisch von dem Platin adsorbirt und dabei eine grosse Wärme entwickelt wird, die ihrerseits wieder den Adsorptionsvorgang begünstigt. Schliesslich wird ein Abschmelzen der Platinspitze eintreten müssen.

Somit erweist sich die Einseitigkeit des mit Schwefelsäure gefüllten Wehnelt-Unterbrechers als eine secundäre Erscheinung, welche mit dem eigentlichen Vorgang der Unterbrechung nichts zu thun hat.

Göttingen, Physikal. Inst. d. Univ., 27. April 1899.²⁾

1) W. Nernst, Theor. Chemie, 2. Aufl. p. 167. 1898.

2) Für die Durchführung der Versuche dieser Arbeit bot mir die elektrotechnische Abtheilung des Laboratoriums der Göttinger Vereinigung ihre werthvollen Hilfsmittel. Meinem Freunde Prof. Des Coudres, fühle ich mich für die Ueberlassung derselben, wie für manchen werthvollen Rath aufs Herzlichste verpflichtet.

(Eingegangen 28. April 1899.)