**6. Zur Theorie des Wehneltunterbrechers;
von Eugen Klupathy.**

(Vorgelegt der ungarischen Akademie der Wissenschaften (III. Classe)
in der Sitzung am 26. Mai 1902.)

Zur Erklärung des Wehneltunterbrechers ist heute beinahe allgemein jene thermomechanische Auffassung angenommen, welche ausführlich von H. Th. Simon¹⁾ entwickelt wurde und laut deren der durch den Unterbrecher geleitete Strom die die positive Drahtelektrode umfassende dünne Schicht des Elektrolyten wegen der dort sich entwickelnden grossen Joulewärme plötzlich zur Verdampfung bringt und dadurch den Strom zwischen Drahtelektrode und Elektrolyt unterbricht. Im Momente der Unterbrechung entsteht in der Leitung ein Selbstinductionsfunke, welcher die Dampfschicht von dem Drahte durch die mechanische Wirkung der Explosion entfernt, infolge dessen kommt dieselbe wieder in Berührung mit dem Elektrolyten, und so wiederholt sich weiterhin die Schliessung und Unterbrechung des Stromes. Th. Simon hat ursprünglich das Entfernen der isolirenden Dampfschicht durch die nach der Unterbrechung des Stromes entstandene Abkühlung bez. Condensation erklärt, jedoch nach den Experimenten E. Ruhmer's²⁾ ist es klar, dass jenes der Selbstinductionsfunke hervorbringt. (Einen neueren Beweis desselben werde ich später bei der Beschreibung der Condensatorversuche geben.) Die Untersuchungen Simon's, Ruhmer's und anderer haben dieser Erklärung einen genügenden qualitativen Beweis gegeben, besonders bei der Erwärmung des Elektrolyten und bei der Veränderung des Druckes.

Nur das polarische Verhalten des Unterbrechers kann diese Theorie nicht erklären. Es ist Thatsache, dass wenn die Drahtelektrode Kathode ist, so ist die Wirkung des Unterbrechers eine ganz andere, wie wenn sie Anode ist. Im

1) H. Th. Simon, Wied. Ann. 68. p. 273. 1899.

2) E. Ruhmer, Elektrotechn. Zeitschr. 20. p. 456. 1899.

Fälle der Kathode sind die Unterbrechungen unregelmässig, die Funken des in die Leitung eingeschalteten Ruhmkorff-Apparates sind sehr klein und die Kathode schmilzt leicht ab. Simon kann diese Polarität nicht erklären und weist nur dahin, dass der Grund dieser Erscheinung eine specielle und unbekannte Wirkung des an der Kathode ausgeschiedenen Wasserstoffs sein kann. Da im Falle der Kathode im Unterbrecher *scheinbar* auch schon bei schwächerem Strome Unterbrechungen stattfinden, schliesst auch Walter¹⁾, dass die an der Kathode abgeschiedenen zwei Volumeneinheiten Wasserstoff-Gasschicht, vereinigt mit dem Wasserdampfe, den Strom eher unterbrechen, bevor er seine volle Stärke erreicht.

Gleich nach der ersten Mitteilung Wehnelt's habe ich die Einwirkung eines eingeschalteten Condensators auf die Function des Unterbrechers untersucht²⁾ und abweichend von Wehnelt³⁾ gefunden, dass bei kleinen Drahtelektroden die parallele Schaltung des Condensators die Frequenz erhöht und die Stromstärke vermindert. Wehnelt fand, dass die Frequenz stets vermindert wurde. Damals habe ich wegen Mangel an Stromquelle meine Versuche unterlassen müssen, jetzt aber, da diese mir zur Verfügung steht, wieder fortgesetzt.

In erster Linie habe ich meine Aufmerksamkeit darauf gelenkt, ob die Erscheinungen im Unterbrecher bei Anode und Kathode wesentlich gleich sind, wie es die Erklärung Simon's erfordert.

Infolge dessen habe ich untersucht, was für einen Einfluss die Einschaltung des Condensators auf den Unterbrecher in beiden Fällen ausübt, nämlich wenn die Drahtelektrode Anode oder Kathode ist.

Die Wirkung des Condensators, wenn die Spitze Anode ist. Der Unterbrecher war in die primäre Spule eines Kohl'schen 20 cm-Inductors geschaltet (Fig. 1), als Stromquelle diente die städtische centrale Leitung (110 Volt). In den secundären Kreis war eine Funkenstrecke von 4 cm Länge eingeschaltet. Im Falle dünner (0,58—0,73 mm dicken und 5—6 mm langen)

1) B. Walter u. A. Voller, Wied. Ann. 68. p. 548. 1899.

2) E. Klupathy, Math. és Physikai lapok p. 191. 1899.

3) A. Wehnelt, Wied. Ann. 68. p. 233. 1899.

Anoden habe ich dasselbe Resultat erzielt, wie bei meinen ersten Versuchen, dass bei der parallelen Schaltung des Condensators die Stromstärke sinkt, die Zahl der Unterbrechungen aber wächst und die Lichterscheinung an der Anode sich vermindert. Die in die Leitung des Condensators geschaltete Glühlampe von 56 Volt und 16 Kerzenstärke leuchtet schön schon bei 0,5 Mikrof. (die Stromstärke betrug an einem Hitzdraht-Ampèremeter 0,8—1 Amp.). Bei Einschaltung von grösserer Capacität (2—3 φ) steigt der Ton der secundären Funken, jedoch löscht der Condensator den Funken leicht aus und im Unterbrecher tritt der sogenannte „Stromumschlag“¹⁾

Fig. 1.

auf. Das ist leicht begreiflich: der Condensator wirkt gerade so wie bei dem gewöhnlichen Foucaultunterbrecher, er absorbiert den Selbstinductionsfunken und so hält die Dampfschicht den Strom unterbrochen. Dies bestätigt auch die Erscheinung, dass bei der Einschaltung des Condensators das am Drahte auftretende Licht schwächer wird. *Auch diese Thatsache beweist, dass das Schliessen des Stromes nicht durch Condensation, sondern durch die mechanische Wirkung des Selbstinductionsfunken hervorgerufen wird.*

Wenn ich aber in dieselbe Leitung einen Unterbrecher mit einer Anode von 1 mm Dicke schaltete, so war der Ton des Funkens nach Einschaltung des Condensators tiefer geworden und das Auslöschen des Unterbrechers durch den Condensator geschah viel eher. Dies entspricht Hrn. Wehnelt's Erfahrung, er benutzte auch eine Anode von 1 mm Dicke. Diese Aenderung der Wirkung des Condensators habe ich auch dann bemerkt, als ich bei demselben Unterbrecher die Selbstinduction der Leitung änderte. Zu diesem Zwecke habe ich zu dem Ruhmkorff'schen Apparat noch eine Spule ein-

1) K. R. Koch u. Wüllner, Wied. Ann. 45. p. 475. 759. 1892.

geschaltet, deren Selbstinduction durch Einlegen verschiedener Eisendrähte sich veränderte. Bei Steigerung der Selbstinduction wächst bis zu einer gewissen Grenze die Frequenz, danach kehrt die Wirkung um, der Ton wird tiefer.

Es liegt der Gedanke nahe, dass — wie es Walter bei dem gewöhnlichen Unterbrecher bewiesen hat — auch hier bei der Aenderung der Capacität des Condensators eine solche Umkehrung zu erreichen wäre. Jedoch ist dies mit den mir zur Verfügung stehenden Capacitäten nicht gelungen. Da in dem Ruhmkorff'schen Apparat die sekundäre Funkenlänge allgemein kleiner wird bei Benutzung des Condensators, die Frequenz aber steigt, ist anzunehmen, dass der Condensator die Zeitdauer des Schliessungsstromes dadurch vermindert, dass die Elektrizitätsmenge des Selbstinductionsfunken sich durch den Unterbrecher entladet. Die Erklärung dieser Frage beansprucht besondere Messungen, mit deren Ausführung ich mich jetzt nicht beschäftigen kann, ist aber auch vorläufig für mein Ziel von minderer Bedeutung.

Die Wirkung des Condensators, wenn die Spitze Kathode ist, ist vom vorigen ganz abweichend. Die Lichterscheinung wird meistens gestärkt, der Ton des Unterbrechers wird zischend und die hellen Funken, welche ohne Condensator oft nur an einzelnen Stellen der Kathode erscheinen, umfassen die ganze Oberfläche derselben. Bis 3 φ habe ich in der Tonhöhe des Unterbrechers keine Veränderung wahrgenommen; die Auslöschung erfolgt nicht, und die Glühlampe in der Leitung des Condensators leuchtet nicht. Dieses, von der früheren gänzlich abweichende Verhalten weist darauf hin, dass im Falle der Kathode die in dem Unterbrecher auftretende Erscheinung auch wesentlich verschieden ist von der bei der Anode; wenn wir nun die Erklärung Simon's annehmen, müssen die zwei Erscheinungen wesentlich gleich sein, es muss ja doch die durch den Strom in dem Elektrolyten erzeugte Joulewärme in der Umgebung der Anode und Kathode gleich sein. Infolge dieser Abweichungen habe ich die Erklärung Simon's eingehend untersucht, besonders von jenem Standpunkte, *ob die Joulewärme des Stromes thatsächlich im Wehneltunterbrecher die Verdampfung des Elektrolyten während der Dauer der Stromschliessung bewirken kann?*

Hr. Simon setzt voraus, dass zu diesem Zwecke die Joulewärme genügend wäre und stützt sich auf Richarz' ¹⁾ Experimente und Rechnungen. Dieser Forscher fand, dass in der Nähe von 0,1, 0,35 und 0,08 mm dicken, 10 mm langen Drähten 1 Ampère Strom in 1 Sec. die Schwefelsäurelösung bis zum Siedepunkte erwärmen kann. Simon fügt aber zu, dass beim Wehneltunterbrecher der grösste Teil des Widerstandes am Ende der Drahtelektrode — an der Spitze — sich entwickelt und daher dort die Wärme noch grösser sein mag. Wenn wir aber die Angaben von Richarz und Simon's Daten für den Wehneltunterbrecher vergleichen, so zeigt sich, dass die Joulewärme zur Verdampfung der Flüssigkeit ungenügend ist.

Richarz hat die Erwärmung eines in einem cylindrischen Ringe befindlichen, einen cylindrischen Draht umfassenden Elektrolyten ausgerechnet in jenem Falle, wenn der Strom in radialer Richtung durch den Cylinder fliesst, und hat dadurch die Wirkung der Spitze ausser acht gelassen. Er fand, dass 1 Amp. in 1 Sec. in 50 proc. Schwefelsäurelösung

$$\vartheta = 2,78 \frac{\log \text{nat} \frac{b}{a}}{b^2 - a^2} \text{ } ^\circ \text{C.}$$

Erwärmung hervorbringt, wenn a der Radius des Drahtquerschnittes, $b - a$ die Dicke der Elektrolytschicht, und 10 mm die Drahtlänge war. Daraus folgt, dass an der Oberfläche des Drahtes die Erwärmung einer unendlich dünnen Schicht ($b = a$)

$$\vartheta_0 = \frac{1,39}{a^2}$$

beträgt.

Bei den Untersuchungen von Richarz war $a = 0,04$ mm und so $\vartheta_0 = 870$ °C.; dies ist natürlich in diesem Falle genügend zur Verdampfung der unendlich dünnen Schicht.

Aus den Experimenten Simon's sehen wir, dass ein Unterbrecher mit 5 mm langem und 1 mm dickem Drahte und 9 Amp. effektivem Strom im Durchschnitt mit $4 \cdot 10^{-3}$ Perioden gearbeitet hat; bei einem Drahte von solcher Dimension würde 1 Amp. in 1 Sec. an der Oberfläche nach

1) F. Richarz, Wied. Ann. 39. p. 83. 1890.

Richarz' Formel nur $22,4^\circ$ Erwärmung hervorrufen, 9 Amp. bei $4 \cdot 10^{-3}$ Sec. Schliessungsdauer aber nur $7,25^\circ$ Temperaturerhöhung hervorbringen. Das ist keineswegs genügend zur Verdampfung der Schwefelsäureschicht, auch wenn an der Drahtelektrode — an deren Spitze — eine grössere Erwärmung entstehen würde, wie es Th. Simon voraussetzt.

Unterbrecher ohne Spitze.

Zur Entscheidung dieser Frage habe ich einen solchen Unterbrecher zusammengestellt, in welchem keine Spitze vorhanden war und die Erwärmung des Elektrolyten in der vorher erwähnten Weise berechenbar ist, abgesehen natürlich von den Verlusten durch Leitung, Convection etc., sodass der ausgerechnete Wert das Maximum der Erwärmung giebt.

Bei dem zu diesem Zwecke benutzten Unterbrecher „ohne Spitze“ ist der gerade Platindraht in zwei L-förmig gebogene

Fig. 2.

Glasröhren eingeschmolzen oder in einem Speckstein-Einloch-Gasbrenner mittels Kautschuk befestigt (Fig. 2). Zur Einführung des Stromes dienten Quecksilber und Kupferdrähte. In diesem Unterbrecher können wir auch den Einfluss der Erwärmung der Elektrode untersuchen. Wird die Elektrode durch einen äusseren Strom erwärmt, so zeigt

sich, dass die Erwärmung der Elektrode die Frequenz steigert, weil sie jene Zeitdauer vermindert, welche notwendig ist, dass der Elektrolyt verdampfe. Auch dies beweist, dass hier allein nur die Wärme diese Unterbrechung hervorbringt. Zur Entscheidung des Einflusses der Spitze habe ich in das Gefäss des Unterbrechers zwei Elektroden von gleicher Dimension gestellt — die eine ohne Spitze, die andere mit Spitze. Mit einem Umschalter im Stromkreise diente bald die eine, bald die andere als Anode im Unterbrecher. Bei der Umschaltung veränderte sich weder die Stromstärke noch die Frequenz, woraus folgt, dass der Einfluss der Spitze der Elektrode auf die Function des Unterbrechers unwesentlich ist. Daraus folgt, dass die Joulewärme, welche sich in der die Drahtelektrode umfassenden dünnen Flüssigkeitsschicht entwickelt, nicht

genügend ist zur Erklärung des Wehneltunterbrechers. Wenn wir die Erwärmung in einem solchen Unterbrecher ohne Spitze in der Nähe der Drahtelektrode befindlichen $(b - a)$ dicken Elektrolytschicht berechnen, finden wir:

$$\vartheta = \frac{0,24 \cdot \omega \cdot i^2 t}{\pi (b^2 - a^2) h s \cdot c},$$

wo der Widerstand der Elektrolytschicht

$$w = h \frac{\ln \frac{b}{a}}{2 \pi h},$$

daher

$$(1) \quad \vartheta = \frac{0,24 k}{2 \pi^2 h^2 s \cdot c} \cdot \frac{\ln \frac{b}{a}}{b^2 - a^2} i^2 t,$$

wo k der spezifische Widerstand ($\Omega \text{ cm}^{-1}$) des Elektrolyten, h die Länge der Drahtelektrode (cm), a der Radius des Querschnittes (cm), s die Dichte des Elektrolyten, c die spezifische Wärme, i die Stromstärke (Amp.), t die Zeit (Sec.) bedeutet.

Für die Erwärmung der an der Oberfläche der Elektrode befindlichen unendlich dünnen Flüssigkeitsschicht ($b = a$) hat man:

$$(2) \quad \vartheta_0 = \frac{0,24 k}{2 \pi^2 h^2 s \cdot c} \cdot \frac{1}{2 a^2} i^2 t.$$

Aus diesen zwei Formeln folgt z. B. bei einem 1 mm dicken und 5 mm langen Platindraht in 10 proc. Schwefelsäurelösung ($s = 1,07$, $c = 0,9$, $k = 2,6$) für die Erwärmung einer $1/10$ und $1/1000$ mm dicken Schicht bei $i = 1$ Amp., $t = 1$ Sec.

$$\vartheta_{0,1} = 21,8^\circ \text{ C.}, \quad \vartheta_{0,001} = 26,2^\circ \text{ C.} \quad \text{und} \quad \vartheta_0 = 26,3^\circ \text{ C.}$$

Wenn nun die Periode des Unterbrechers $T = 4 \cdot 10^{-3}$ ist und die Stromstärke 9 Amp., so ist die Erwärmung während der Dauer einer Schliessung allerdings kleiner als

$$\vartheta'_{0,1} = 7,06, \quad \vartheta'_{0,001} = 8,48, \quad \vartheta'_0 = 8,52.$$

Die Joulewärme genügt daher nicht einmal zur Erwärmung bis zum Siedepunkte, desto weniger zur Verdampfung der Flüssigkeit. Es ist zu beachten, dass die hier in Betracht genommene Stromstärke die am Glühdrahtampèremeter ge-

gemessene effective Stromstärke ist, also der Wert des Stromintegrals für die Dauer der Oeffnung und Schliessung

$$i_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_1} i^2 dt},$$

sodass wir den Mittelwert des Schliessungsstromes etwas grösser, vielleicht 10—11 Amp. rechnen müssen, jedoch ändert sich dadurch das Resultat nicht wesentlich, weil laut allen Experimenten die Zeitdauer der Schliessung viel grösser ist, als die der Unterbrechung. Die früher erwähnte Thatsache, dass die Erwärmung der Elektrode die Frequenz steigert und die Stromstärke vermindert, beweist neuerdings, dass für die Anode die Verdampfungstheorie richtig ist; es ist nur noch eine andere Wärmequelle zu suchen, denn die Joulewärme genügt dazu nicht.

Diese Thatsache, combinirend mit den polaren Eigenschaften, d. h. dass die Erscheinungen bei Kathode und Anode wesentlich verschieden sind, *zu erklären, suchte ich die Wärmequelle, welche zur Hervorbringung der Erscheinungen notwendig ist, in der Peltierwärme.* Es ist nun die Frage, ob die Peltierwirkung solch eine grosse Erwärmung hervorbringen kann.

Bouty¹⁾, Jahn²⁾ und Gill³⁾ haben experimentell die Existenz des Peltiereffectes an der Trennungsfläche der Metalle und Elektrolyte bewiesen. Die Messungen von Bouty und Gill haben zu beinahe gleichen Resultaten geführt und zeigen, dass in den meisten Fällen die Kathode sich abkühlt und die Anode sich erwärmt. Da aber an den Trennungsflächen der Metalle die Grösse der Peltierwirkung unabhängig ist von der Grösse derselben, ist es auch höchstwahrscheinlich der Fall bei den Metallen des Elektrolyten, und so ist es natürlich, *dass bei Elektroden mit kleiner Oberfläche die Erwärmung und Abkühlung gross sein kann.* Daraus folgt auch, dass man die durch die Peltierwirkung hervorgebrachte Tem-

1) E. Bouty, Compt. rend. 89. p. 146. 1877; 90. p. 987. 1880; 92. p. 868. 1881.

2) Jahn, Wied. Ann. 34. p. 755. 1888.

3) J. Gill, Wied. Ann. 40. p. 115. 1890.

peraturänderung auf Elektroden von kleiner Oberfläche zu messen hat.

Die Grösse der Peltierwirkung im Falle von Platin und Schwefelsäurelösung oder Kupfer und Kupfersulfat ist absolut noch nicht bestimmt, aber nach den Daten von Bouty und Gill¹⁾ können wir für Kupfer und Kupfersulfat als kleinsten Wert beiläufig 150 g-Cal. annehmen bei 1 Amp. pro Stunde, sodass auf 1 Amp. pro Sec. gleich 0,042 g-Cal. und bei 9 Amp. und $4 \cdot 10^{-3}$ Sec. $36 \cdot 10^{-3} \cdot 0,042 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ g-Cal. die erzeugte Wärme an der Anode und gerade soviel die absorbierte an der Kathode wäre. Diese Wärmemenge würde um die Anode eine $\frac{1}{1000}$ mm dicke Schicht, deren Inhalt $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3$ beträgt, mit 100° C. aufwärmen, wenn wir die Erwärmung des Drahtes vernachlässigen, denn:

$$\vartheta = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9 \cdot 1,07} = 100^\circ.$$

Derselbe Strom entwickelt in derselben Zeit in dieser $\frac{1}{1000}$ mm dicken Schicht $81 \times 4 \cdot 10^{-3} \cdot w$ g-Cal. Joulewärme, welche ($q_{0,001} = 0,00013$ g-Cal.), wie wir früher gesehen haben, nur $8,48^\circ \text{ C.}$ Temperaturerhöhung verursacht. An der Trennungsfläche des Platins in Schwefelsäurelösung ist nach Gill die Peltierwirkung mehr als zweimal so gross, sodass doch die Erwärmung mehr als 200° C. betragen würde. *Aus diesen Daten ist es klar, dass die Peltierwärme an einer kleinen Elektrode eine solche Erwärmung hervorbringt, welche zur Erklärung des Wehneltunterbrechers genügend ist.* Und zwar je kleiner die Oberfläche der Elektrode, desto mehr tritt die Peltierwärme hervor, weil einerseits die auf die Flächeneinheit entfallende Wärmeentwicklung sich vermehrt, anderseits dementsprechend der Strom schwächer wird; die Joulewärme ändert sich aber proportional mit dem Quadrate der Intensität, die Peltierwärme jedoch nur mit der ersten Potenz. Ausserdem zeigen die Experimente Gill's²⁾, dass eben für die Trennungsfläche der Platin-Schwefelsäurelösung und Kupfer-Kupfersulfatlösung die Peltierwirkung gerade im Momente der Schliessung mit grösserer Intensität auftritt, und nicht propor-

1) G. Wiedemann, Elektrizität, 2. p. 343. 1899.

2) J. Gill, Wied. Ann. 40. p. 129. 1890.

tional mit der Zeit wächst, sodass bei so kurze Zeit dauernden ($4 \cdot 10^{-8}$ Sec.) Stromschliessungen, welche beim Wehneltunterbrecher vorkommen, die Peltierwirkung verhältnismässig noch grösser sein wird. Obzwar die Versuche Bouty's und Gill's ohne Zweifel die Peltierwirkung an der Trennungsfläche der primären und secundären Leiter bewiesen haben, so wollte ich mich doch unmittelbar überzeugen, ob diese an den Elektroden des Wehneltunterbrechers beweisbar ist.

Zu diesem Zweck habe ich einstweilen einen solchen Unterbrecher ohne Spitze benutzt, in welchem zur Drahtelektrode in der Glasröhre ein Eisendraht angelötet war, und deshalb diente er als eine Contactfläche eines Thermoelementes; ausserhalb des Unterbrechers war in ein anderes Gefäss wieder ein Pt/Fe-Drahtpaar eingesetzt, und mit dem früheren verbunden gab es ein Thermoelement. Das Ganze konnte in einen Hartmann-Braun'schen, sehr empfindlichen Zeigergalvanometer mit kleinem Widerstand eingeschaltet werden (Fig. 3).

Fig. 3.

Dass ich allen Zweifel vermeide, bin ich so verfahren, dass, während ich durch den Wehneltunterbrecher einen Strom führte, die Leitung des Thermoelementes mit dem Galvanometer nicht verbunden war und habe es nur einen Moment nach der Oeffnung des Hauptstromes mit jenem verbunden. Auch so zeigte das Galvanometer grosse (4—5 Striche) Ausschläge und zwar an der Scheidefläche Pt/ H_2SO_4 und Cu/ $CuSO_4$ in der Richtung der Abkühlung der Kathode und Erwärmung der Anode. Zur Controle habe ich auch Ag/ $AgNO_3$ untersucht und den Daten Bouty's und Gill's entsprechend die Erwärmung der Kathode und Abkühlung der Anode gefunden. Besonders gut gelingt die Abkühlung der Kathode an der Platinelektrode zu zeigen, wenn wir eine so kleine Spannung wählen, dass um den Draht keine Lichterscheinung auftritt, weil man sonst nur die Differenz zwischen der Erwärmung der Anode und Kathode constatiren kann. Es gelingt auch

diese Peltierwirkung so zu zeigen, wenn wir statt zwei thermoelementartig verbundenen Unterbrechern „ohne Spitze“ zwei als Bolometer dienende, aus sehr feinem Platindraht bestehende Unterbrecher „ohne Spitze“ benutzen. Von diesen Messungen will ich derzeit nicht ausführlicher sprechen, ich erwähne es nur, weil bei den elektrocapillaren Erscheinungen diese Erwärmungen und Abkühlungen, welche wegen der Peltier- und Joulewirkung an den Quecksilberelektroden von kleiner Oberfläche auftreten, auch in Betracht zu nehmen sind und zur Erklärung des absteigenden Astes der Oberflächenspannungscurve beitragen und jene Abweichungen erklären können, welche zwischen den Daten bemerkbar sind, welche an grossen und kleinen Quecksilberflächen beobachtet wurden.

Durch das bisher Gesagte finde ich es als bewiesen, dass in der Hervorbringung der Erscheinungen im Wehneltunterbrecher die Hauptrolle der Peltierwirkung zukommt. Wenn die Drahtelektrode eine Anode ist, addiren sich die Joule- und Peltierwärme und bringen regelmässig sich wiederholende Unterbrechungen hervor; ist dagegen die Drahtelektrode eine Kathode, so können wegen der Peltierabkühlung solche Unterbrechungen nur bei sehr starkem Strome vorkommen; jedoch tritt früher eine andere Erscheinung auf, welche den Eindruck macht, als wenn da auch dieselben Unterbrechungen vorkämen wie im Falle der Anode. Diese Erscheinung besteht darin, dass zwischen der kälteren Kathode und der wärmeren Anodeflüssigkeit durch die während der Elektrolyse in grosser Quantität erzeugte Hydrogenschicht ein Voltalichtbogen entsteht. Die Entstehung dieses Lichtbogens verursacht, dass die Kathode verhältnismässig leichter verbrennt bez. abschmilzt. Die Ursache davon, dass an der Anode kein Lichtbogen entsteht, nur an der Kathode, ist nach meiner Ansicht diejenige, dass das Wasserstoffgas verhältnismässig ein guter Leiter ist, der Wasserdampf dagegen beinahe isolirt.¹⁾ An der Anode wird also der Strom durch den Wasserdampf, welcher durch die gemeinsame Wirkung der Joule- und Peltierwärme erzeugt wird, fast ganz unterbrochen und die Verbindung zwischen dem positiven Draht und dem Elektrolyt wird

1) A. Winkelmann, „Handbuch d. Physik“ III. 1. p. 373.

allein durch die mechanische Kraft des Selbstinductionsfunken (durch die Explosion des dissociirten Wasserdampfes) wieder hergestellt; daher kommen die regelmässigen Unterbrechungen und die grossen Stromschwankungen. An der Kathode kommt aber keine Wasserdampfschicht zu stande, und so schwächt den Strom nur der Widerstand der ausgeschiedenen sehr dünnen Wasserstoffschicht, gleichzeitig aber, wenn die äussere Spannung eine gewisse Grenze überschritten hat, ist die Möglichkeit vorhanden zum Entstehen des Lichtbogens. Das ist der Grund, warum man bei der Kathode nicht dieselben Erscheinungen bei Einschaltung des Condensators findet, wie wenn die Drahtelektrode eine Anode ist, und dass das Spectrum des Kathodenlichtes ausser des Wasserstoffs auch die Linien der Kathode giebt. (Es wäre interessant, diesen Wasserstoffbogen, wie es Duddel mit dem gewöhnlichen Voltabogen that, durch Einschaltung entsprechender Capacitäten zum Tönen zu bringen.) Diese Auffassung erklärt auch, warum bei dem Lochunterbrecher¹⁾, bei welchem die Unterbrechungen nicht an der Oberfläche der Elektrode stattfinden, sich keine Polareigenschaft zeigt.

Die Periode der an der Anode entstandenen Unterbrechungen hat Simon mit einer gewissen Annäherung auszurechnen versucht, ausgehend von jener Auffassung, dass die Erwärmung der Flüssigkeit durch die Joulewärme des Stromes hervorgebracht wird. Dies bedingt nun eine Erweiterung.

Diese kann für den Unterbrecher ohne Spitze leicht durchgeführt werden, abgesehen von der Wärmeleitung, Convection und anderen Wärmeverlusten, welche hier in die Formel kaum hineingebracht werden können.

Bezeichnen wir mit T_1 die Zeitdauer des Stromschliessens im Unterbrecher, mit T_2 die der Oeffnung, dann ist die Periode des Unterbrechers

$$T = T_1 + T_2.$$

Während der Dauer des Schliessens ist die Stromstärke in jedem Augenblicke durch die Formel gegeben:

$$(3) \quad i = \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L} t} \right),$$

1) A. Wehnelt, Wied. Ann. 68. p. 233. 1899; H. Th. Simon, Wied. Ann. 68. p. 860. 1899; E. W. Caldwell, Elektr. Rev. New-York 1899.

wo E die elektromotorische Kraft der Batterie, L den Selbstinductionscoefficienten und r den Widerstand der ganzen Leitung bedeutet.

Während der Zeit T_1 ist die Temperaturerhöhung der mit der Elektrode sich berührenden $(b-a)$ dicken, kleinen Elektrolytschicht wegen der Joulewärme (1)

$$\vartheta_j = \frac{0.24 k}{2 \pi^2 h^2 s \cdot c} \cdot \frac{\ln \frac{b}{a}}{b^2 - a^2} \int_0^{T_1} i^2 dt = A \int_0^{T_1} i^2 dt,$$

und wegen der Peltierwirkung

$$\vartheta_p = \frac{p}{s \cdot c h \pi (b^2 - a^2)} \int_0^{T_1} i dt = B \int_0^{T_1} i dt,$$

wo p der Factor der Peltierwirkung, A und B von den Elektroden und Elektrolyt abhängende Constanten sind.

Die in diesen Ausdrücken vorkommenden Integrale können mit Hülfe der Gleichung (3) ausgerechnet werden, und zwar:

$$\begin{aligned} \int_0^{T_1} i^2 dt &= \frac{E^2}{r^2} \int_0^{T_1} \left(1 - 2 e^{-\frac{r}{L} t} + e^{-2 \frac{r}{L} t} \right) dt \\ &= \frac{E^2}{r^2} \left\{ T_1 - \frac{2L}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{L} T_1} \right) + \frac{L}{2r} \left(1 - e^{-2 \frac{r}{L} T_1} \right) \right\}. \end{aligned}$$

Wenn wir in Betracht ziehen, wie es Simon¹⁾ gezeigt hat, dass die Zeitconstante des Leiters L/r gewöhnlich sehr klein ist, sodass wir

$$e^{-\frac{r}{L} T_1} \quad \text{und} \quad e^{-2 \frac{r}{L} T_1}$$

neben der Einheit vernachlässigen können, so ist

$$(4) \quad \int_0^{T_1} i^2 dt = \frac{E^2}{r^2} \left(T_1 - \frac{3}{2} \frac{L}{r} \right),$$

1) H. Th. Simon, Wied. Ann. 68. p. 282. 1899.

und auf ähnliche Weise

$$(5) \quad \int_0^{T_1} i \, dt = \frac{E}{r} \left(T_1 - \frac{L}{r} \right).$$

Führen wir die Werte von

$$\int_0^{T_1} i^2 \, dt \quad \text{und} \quad \int_0^{T_1} i \, dt$$

in die Ausdrücke ϑ_j und ϑ_p , so bekommen wir die ganze Temperaturänderung der Elektrolytschicht:

$$\vartheta = \vartheta_j + \vartheta_p = A \frac{E^2}{r^2} \left(T_1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{L}{r} \right) + B \frac{E}{r} \left(T_1 - \frac{L}{r} \right)$$

und daraus die Zeitdauer der Stromschliessung

$$T_1 = \frac{\vartheta}{A \frac{E}{r} + B} \cdot \frac{r}{E} + \frac{L}{r} \frac{\frac{3}{2} \frac{A E}{r} + B}{\frac{A E}{r} + B} = \frac{\vartheta \frac{r}{E} + \frac{L}{r} \left(\frac{3}{2} \frac{A E}{r} + B \right)}{A \frac{E}{r} + B}.$$

Und wenn wir die Zeit der Unterbrechung, welche wir nicht ausrechnen können, mit T_2 bezeichnen, so ist die Periode des Unterbrechers (T):

$$(6) \quad T = T_1 + T_2 = \frac{\vartheta \frac{r}{E} + \frac{L}{r} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{A E}{r} + B \right)}{\frac{A E}{r} + B} + T_2.$$

In dieser Formel bedeutet ϑ jene Temperaturerhöhung, welche notwendig ist, dass die dünne Schicht des Elektrolyten verdampfe; dies hängt in erster Linie von der Differenz zwischen dem Siedepunkte des Elektrolyten und der vorwaltenden Temperatur ab, und es tritt noch der Temperaturwert der latenten Wärme der Verdampfung hinzu, d. h.

$$\vartheta = f - t + \mu.$$

Daraus ist sofort klar, dass bei der Erhöhung der Temperatur (t) ϑ kleiner wird, ebenso auch T , und es wächst die Frequenz. Dieselbe Wirkung hat die Minderung des Druckes,

weil dann f kleiner wird, und umgekehrt die Vergrößerung des Druckes die Frequenz vermindert.

Der Wert von A und B ist abhängig von der Dicke der verdampften Schicht, wie von der Dicke und Länge der Drahtelektrode, und zwar mit jedem umgekehrt proportional. Je dünner der Draht, desto dünner wird auch die verdampfende Schicht und so werden desto schneller die Unterbrechungen erfolgen. Etwas einfacher gestaltet sich die Formel, und zwar der Wert der Constante A , wenn wir anstatt der $(b-a)$ dicken Schicht die Erwärmung einer unendlich dünnen Schicht in Betracht ziehen. Wenn wir die Peltierwirkung nicht in Betracht ziehen, d. h. $B = 0$, so giebt die Gleichung (6) die Formel von Simon¹⁾ in einer etwas anderen Form.

Im ersten Augenblicke ist es auffallend, dass bei dem Lochunterbrecher die Joulewärme zur Verdampfung des Elektrolytes genügend ist, dagegen bei dem Wehneltunterbrecher nicht; wir müssen aber bedenken, dass dort der Querschnitt der Flüssigkeitsschicht kleiner ist. Wenn wir z. B. eine Oeffnung mit dem Querschnitte q verwenden, so ist der Widerstand einer Flüssigkeitsschicht von der Länge l

$$\omega = k \frac{l}{q},$$

und die entwickelte Wärme

$$Q = 0,24 \cdot k \cdot \frac{l}{q} i^2 t \text{ g-Cal.}$$

Ist die Masse der Schicht $m = l \cdot q \cdot s$, so ist die Erhöhung der Temperatur

$$\vartheta = \frac{0,24 \cdot k}{s \cdot c \cdot q^2} i^2 t,$$

daher ist sie unabhängig von der Länge der Schicht. Wenn der Querschnitt der Oeffnung z. B. $q = 1 \text{ mm}$, und im Unterbrecher eine 10 proc. H_2SO_4 -Lösung ist, so wird die Temperaturerhöhung bei $i = 1 \text{ Amp.}$ und $t = 1 \text{ Sec.}$

$$\vartheta = \frac{0,24 \cdot 2,6}{0,9 \cdot 1,07 \cdot \frac{1}{10^4}} = 6460^\circ \text{ C.}$$

1) H. Th. Simon, Wied. Ann. **68**. p. 284. 1899.

So ist es begreiflich, dass die Flüssigkeit nicht nur verdampft, sondern der Dampf auch dissociirt, wie auch thatsächlich das in dem durchlöcherten Unterbrecher aufsteigende Gas zum grössten Teile Knallgas ist. *Bei dem Wehneltunterbrecher kann die Dissociation nur an der Anode auftreten, eine grössere Menge Knallgas kommt nach Untersuchungen Wehnelt's thatsächlich nur an der Anode vor und bildet sich nur bei grösserer Spannung; dagegen an der Kathode entwickelt sich — weil sie kalt ist — reinen Wasserstoff, die Spuren von Oxygen rühren von der im Bogen dissociirten kleinen Menge Wasserdampf her.*

Beim Lochunterbrecher können wir die Periode in folgender Form schreiben, wenn wir wieder die Temperaturerhöhung als Constante des Unterbrechers betrachten und in die frühere Formel für ϑ den Wert des Integrales $\int i^2 dt$ einführen:

$$\vartheta = a \frac{E^2}{r^2} \left(T_1 - \frac{3}{2} \frac{L}{r} \right),$$

wo

$$a = \frac{0,24 k}{s \cdot c \cdot q^2} = \alpha \frac{1}{q^2}.$$

Und so

$$T_1 = \vartheta \frac{r^2}{a E^2} + \frac{3}{2} \frac{L}{r},$$

daher

$$(7) \quad T = \vartheta \frac{r^2 q^2}{\alpha E^2} + \frac{3}{2} \frac{L}{r} + T_2.$$

Daraus folgt, dass die Periode des Lochunterbrechers mit dem Quadrate des Querschnittes der Oeffnung proportional wächst.

Die Resultate dieser Untersuchung kann man in folgende Punkte zusammenfassen:

1. Die Erwärmung der Elektrode des Wehneltunterbrechers durch äusseren Strom erhöht die Frequenz.

2. Die parallele Schaltung eines Condensators bei dünner Anode und kleinerer Selbstinduction erhöht ebenfalls die Frequenz, bei dickem Draht und grösserer Selbstinduction vermindert sie sich.

3. Die Erwärmung des Elektrolyten geschieht nicht hauptsächlich an der Spitze, sondern an der ganzen Oberfläche der

Elektrode; ein Unterbrecher „ohne Spitze“ wirkt gerade so, wie einer mit Spitze von gleicher Dimension.

4. Die Joulewärme genügt nicht zur Verdampfung der die Elektrode umgebenden Flüssigkeitsschicht.

5. Die Peltierwirkung, welche an der Trennungsfläche des Elektrolyten und der Elektrode auftritt, genügt, um an der Anode die regelmässigen Unterbrechungen hervorzurufen, und erklärt die Polareigenschaften des Unterbrechers.

6. Bei dem Lochunterbrecher wächst die Zeit der Unterbrechung mit dem Quadrate des Querschnittes der Oeffnung.

Budapest, den 8. Mai 1902.

(Eingegangen 27. Mai 1902.)