17. Ueber einen neuen Flüssigkeitsunterbrecher; von Hermann Th. Simon.

1. Vor kurzem¹⁾ habe ich eine Theorie des Wehneltunterbrechers entwickelt, welche die Wirkungsweise dieses interessanten Apparates durch eine Localisation von Stromwärme erklärte, die eintreten muss, wenn man in einer elektrischen Zelle eine kleine Elektrode einer grossen gegenüberstellt. In diesem Falle ist der im übrigen grosse Querschnitt der leitenden Flüssigkeitssäule an der Oberfläche der kleineren Elektrode schroff auf einen relativ kleinen Betrag verengt, so dass die Stromdichte und damit die Entwicklung der Stromwärme dort ein scharf ausgeprägtes Maximum besitzt.

Die mathematische Formulirung dieser Auffassung führte zu einer Formel

$$(1) \quad T = \frac{3}{2} \frac{L}{w} + \frac{C_1 w}{E^2} + C_2$$

oder

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

welche die Unterbrechungszeit T in ihrer Abhängigkeit vom Widerstande w , bez. der Oberfläche ω der kleineren Elektrode, der Selbstinduction L und der Betriebsspannung E bestimmt, und die sowohl mit den qualitativen wie quantitativen Beobachtungen in sehr befriedigender Uebereinstimmung gefunden wurde. C_1 , C_2 und k sind Constanten des betreffenden Apparates.

2. Im Verfolge des Grundgedankens dieser Theorie bin ich schon vor längerer Zeit²⁾ zur Construction eines neuen Flüssigkeitsunterbrechers gelangt, über den im Folgenden berichtet werden soll. Ziemlich gleichzeitig mit mir hat Hr. Wehnelt³⁾ selbst, sowie Hr. E. W. Caldwell⁴⁾ in New-York

1) H. Th. Simon, Wied. Ann. 68. p. 273—293. 1899.

2) H. Th. Simon, Deutsche Patentanmeldung vom 19. April 1899.

3) A. Wehnelt, Wied. Ann. 68. p. 262—264. 1899.

4) E. W. Caldwell, Elektr. Rev. New-York. 3. Mai. p. 277. 1899.

auf ganz anderem Wege den neuen Unterbrecher gefunden, der erstere jedoch offenbar in einer so ungünstigen Form, dass ihm das ganze Princip praktisch unanwendbar erschienen ist.

3. Der Gedanke, welcher dem neuen Apparate zu Grunde liegt, ist folgender: wenn es nur die an der kleineren Elektrode vorhandene Querschnittseinschnürung der Strombahn ist, welche den Unterbrechungsvorgang bei dem Wehneltunterbrecher bestimmt, so muss auch bei einer schroffen Querschnittsverengung inmitten eines Flüssigkeitswiderstandes derselbe Vorgang auftreten, d. h. wegen der an der verengten Stelle gesteigerten Stromdichte wird wieder die Entwicklung der Stromwärme dort concentrirt, es tritt bei anwachsendem Strome eine Verdampfung ein, welche den Strom unterbricht.

4. Die Versuche, die ich zur Prüfung dieser Schlussfolgerung unternahm, sollen im Folgenden beschrieben und discutirt werden. Ich habe dieselben z. B. mit folgenden Anordnungen ausgeführt:

a) Fig. 1. Ein Bleirohr von circa 30 cm Länge und 7 cm Durchmesser ist durch einen Bleiboden in ein Standgefäß E_1 verwandelt und dient als die eine Elektrode. Durch einen Hartgummiddeckel D getragen ragt ein gewöhnliches Reagensrohr R von 2—3 cm Durchmesser concentrisch in das Standgefäß hinein. An seinem Boden hat dasselbe eine oder mehrere (bis acht) Durchbohrungen U von 0,5—1 mm Durchmesser, während ein in das Reagensrohr hinein gehängter Bleiblechcylinder E_2 die andere Elektrode bildet. Füllt man den Apparat mit bestleitender verdünnter Schwefelsäure und schaltet ihn in Reihe mit der Primärspule eines Inductoriums, so erhält man bei Stromschluss im Secundärkreise dieselben flammenbogenartigen Funkenentladungen, wie mit dem Wehneltunterbrecher. Beim Betriebe eines 30 cm-Inductoriums z. B. gab ein Rohr mit drei Durchbohrungen von 1 mm Durchmesser bei 130 Volt Betriebsspannung schätzungsweise 500—700 Unterbrechungen in der Secunde, mit 70 Volt 200 bis 300.

Fig. 1.

b) Fig. 2. Ein parallelepipedischer Glastrag T von 7×10 cm Bodenfläche und 25 cm Höhe wurde von oben nach unten durchgeschnitten und die Schnittflächen eben abgeschliffen. Unter Einlage von Gummidichtungen wurden die beiden Trog-

Fig. 2.

hälften gegen eine dünne Glasplatte W gepresst, sodass dieselbe den Trog von oben nach unten in zwei Hälften theilte, in deren jeder eine grosse Bleiplatte E_1 und E_2 als Elektrode stand. Die Glaswand W wurde mit einigen Durchbohrungen U von 1 mm versehen und der ganze Apparat mit bestleitender, verdünnter Schwefelsäure gefüllt. In den Primärkreis eines Inductoriums eingeschaltet, ergab der Apparat wieder die beschriebenen Unterbrechungserscheinungen.

c) Eine weitere mehr interessante wie praktische Versuchsanordnung ist folgende: Wenn man zwei mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Gefässe, in die die Elektroden eintauchen, durch eine umgekehrt **U**-förmige ebenfalls mit Schwefelsäure gefüllte Glasröhre leitend verbindet und in die Glasröhre eine Luftblase bringt, die den Röhrenquerschnitt fast ausfüllt, so tritt an dieser Einschnürungsstelle wiederum die Unterbrechererscheinung auf.

Ich fand diese Form bei dem Versuche, durch eine solche **U**-förmige Röhre bei Form a) und b) einen Nebenschluss von variablem Widerstande anzubringen, durch den die Unterbrecherzahl regulirt werden könnte. Doch ist ein solcher Nebenschluss unökonomisch, zumal man denselben Zweck in anderer Weise besser erreicht. Weitere Anordnungen, die ich z. B. mit Bechergläsern versuchte, unterlasse ich zu beschreiben, da sie praktisch hinter den beschriebenen zurückstehen.

Es muss noch erwähnt werden, dass die Form der Oeffnungen principiell keine Bedeutung besitzt. Ich habe mit demselben Erfolge auch rechteckige Schlitze versucht, die man aus Glasplatten leicht so construiren kann, dass ihr Gesamtquerschnitt regulirbar ist. Man erreicht dadurch dieselben

Vorthelle, wie sie durch die regulirbare Anode bei dem Wehneltunterbrecher erreicht sind.

5. Die Eigenschaften des neuen Unterbrechers sind denen des Wehneltunterbrechers ganz analog. Die Unterbrechungszahl nimmt mit wachsender Selbstinduction des Schliessungskreises ab, mit wachsender Betriebsspannung zu, mit wachsendem Querschnitt der Einschnürungsstelle ab. Die Theorie ist dieselbe wie die des Wehneltunterbrechers, also gilt auch hier die Formel

$$(1) \quad T = \frac{3}{2} \frac{L \omega}{k} + \frac{C_1 k}{\omega} + C_2,$$

wo jetzt ω der Gesamtquerschnitt der Stromeinschnürungsstelle ist.

Die Grösse w der Formel (1) ist unter solcher Voraussetzung eingeführt, dass man den gesammten Widerstand des Schliessungskreises gegen den Uebergangswiderstand der kleineren Elektrode bez. der Einschnürungsstelle vernachlässigen kann, wie das z. B. bei dem Betriebe grösserer Inductorien gestattet ist. Will man die Formel von dieser Einschränkung befreien, so ist

$$(2) \quad T = \frac{3}{2} \frac{L}{w + r} + \frac{C_1 (w + r)}{E^2} + C_2$$

und

$$(2a) \quad T = \frac{3}{2} \frac{L}{\frac{k}{\omega} + r} + \frac{C_1 \left(\frac{k}{\omega} + r \right)}{E^2} + C_2.$$

zu setzen, wo jetzt w der Uebergangswiderstand der Unterbrechungsstelle, r der Widerstand des gesammten übrigen Stromkreises ist.

6. Es ist nicht überflüssig, auf eine für beide Unterbrecher geltende Folgerung der Theorie hinzuweisen, welche mir die Widersprüche aufzuklären scheint, die immer wieder in der Literatur über den Wehneltunterbrecher und auch schon in der Literatur über den hier beschriebenen Unterbrecher¹⁾ auf-

1) Vgl. Ch. T. Child, Elektr. Rev. New-York. 10. Mai p. 295. 1899.

treten. Es wird nämlich widersprechend berichtet, dass eine Vergrösserung der Selbstinduction bald eine Steigerung, bald eine Verminderung der Frequenz der Unterbrechungen bewirkt. Die Theorie zeigt, dass bald das eine, bald das andere auftreten kann, je nachdem man durch eine Veränderung der Selbstinduction gleichzeitig auch den Widerstand des Schliessungskreises verändert oder nicht. Nur wenn man bei der Aenderung der Selbstinduction den Widerstand constant hält, muss stets die Vergrösserung derselben eine Verminderung der Unterbrechungszahl bewirken. Also nicht die Selbstinduction allein, sondern die „Zeitconstante“ L/w des Schliessungskreises ist die für die Unterbrechungszahl maassgebende Constante des Schliessungskreises.

7. Die Unterbrechungszahlen, die der neue Unterbrecher liefert, sind mit denen des Wehneltunterbrechers von gleicher Grössenordnung. Dass Hr. Wehnelt¹⁾ mit demselben viel langsamere Unterbrechungen erhielt, erklärt sich wohl aus einer ungünstigen Anordnung seines Versuches, insbesondere daraus, dass er anscheinend nicht scharfe Einschnürungsstellen, sondern längere Einschnürungscanäle angewendet hat. Darauf deutet der Weg, auf dem er bei seinen Versuchen zu dem neuen Unterbrecher gelangt ist.²⁾ Aus derselben Ursache würde sich auch der angeblich weitere Nachtheil erklären, den Hr. Wehnelt anführt, nämlich der höhere Eigenwiderstand des neuen Unterbrechers. In der That kann man, wie meine Versuche zeigen, den Eigenwiderstand durch zweckmässige Construction auf ein Minimum bringen, welches unter sonst gleichen Umständen von dem Widerstande des Wehneltunterbrechers nicht sehr verschieden ist. Halbkugelige Elektroden dürften hier die günstigsten Resultate liefern, wenn sich im Kugelmittelpunkte die Unterbrecheröffnungen der Trennungswand befinden.

8. Dass der Eigenwiderstand des neuen Unterbrechers und damit seine Unterbrechungszahl unter sonst gleichen Umständen nicht sehr viel von den entsprechenden Grössen beim Wehneltunterbrecher verschieden sein kann, lehrt auch die

1) A. Wehnelt, l. c. p. 264.

2) A. Wehnelt, l. c. p. 262.

theoretische Ueberlegung. Dazu sei daran erinnert, dass die Constante k der Gleichung (1) aus der Beziehung

$$w = \frac{K l}{\omega} = \frac{k}{\omega}$$

hervorgegangen ist und somit die (unbekannte) Länge l der Flüssigkeitssäule enthält, auf der der Querschnitt eingeschnürt ist, auf die also der Unterbrecherwiderstand beschränkt zu betrachten ist. Da bei dem neuen Unterbrecher eine doppel-seitige Einschnürung des Stromes stattfindet, während dieselbe bei dem Wehneltunterbrecher nur einseitig ist, so muss unter sonst gleichen Bedingungen das l und somit das k bei dem ersteren einen ungefähr doppelt so hohen Werth haben wie bei dem letzteren. Mit Rücksicht auf Gleichung (1a) erkennt man somit, dass unter sonst gleichen Bedingungen bei kleiner Betriebsspannung (wo das zweite Glied der Gleichung grössere Geltung besitzt) der Wehneltunterbrecher mehr Unterbrechungen liefert, wie der neue Flüssigkeitsunterbrecher, dass bei höherer Betriebsspannung dagegen das Verhältniss sich umkehrt.

9. Wie auch Herr Wehnelt¹⁾ betont, besitzt der neue Unterbrecher vor dem ursprünglichen eine Reihe nicht unwesentlicher Vortheile: Seine Wirkungsweise ist von der Stromrichtung völlig unabhängig. Infolge dessen unterbricht er auch beim Betriebe mit Wechselstrom im Gegensatz zu dem Wehneltunterbrecher in beiden Stromphasen. Während der Wehneltunterbrecher leicht versagt, insbesondere wenn die Füllungsflüssigkeit durch den Betrieb über 60° erwärmt worden ist, habe ich bei dem neuen Unterbrecher auch bei fortgesetztem Dauerbetriebe ein Versagen noch niemals beobachtet. Man kann ihn daher in kleineren Dimensionen verwenden und kann jeder Kühleinrichtung entbehren. Er ist mit sehr einfachen Mitteln zu beschaffen und nach meinen Erfahrungen von grosser Dauerhaftigkeit. Bei einem Unterbrecher von der Form a) z. B. habe ich ein Reagensglas mit drei Oeffnungen mehrere Monate stark beansprucht, ohne dass die Durchbohrungen der Glaswand eine merkliche Aenderung zeigten.

1) A. Wehnelt, l. c. p. 263.

Anfangs hat sich der Rand etwas glasirt, hat sich seitdem aber nicht mehr verändert. Ueberhaupt hat sich mir Glas bisher am besten für die Trennungswände bewährt. Porcellan habe ich noch nicht versuchen können.

Dass Hr. Wehnelt¹⁾ über die Haltbarkeit der Oeffnungen in Glas schlechte Erfahrungen gemacht hat, hat offenbar wieder seine Ursache in einer ungünstigen Construction seines Apparates. Vielleicht bedingen ausgeblasene Oeffnungen im Glase, wie er sie verwendete, das schnelle Zersplittern. Ich selbst habe stets gebohrte Oeffnungen benutzt.

10. Nur bei einer Versuchsreihe mit Kupfersulfat und Kupferelektroden beobachtete auch ich, solange die Kupfersulfatlösung kalt war, eine schnelle Aussplitterung und Ausweitung der Glasöffnungen unter intensiven Leuchterscheinungen. Es machte direct den Eindruck, als fände in den Oeffnungen eine Verbrennung statt. Nachdem die Lösung durch den Stromdurchgang wärmer geworden war, hörte sowohl das Aussplittern wie das Aufglühen der Oeffnungen auf.

Im übrigen gelangen, wie gegenüber einer Notiz des Hrn. H. Goldstein²⁾ hervorgehoben sei, die Unterbrechungen mit der Kupfersulfatlösung ebensogut wie mit Schwefelsäure, nur bedurfte es zur Erzielung gleicher Wirkung wegen des grösseren Widerstandes weit höherer Betriebsspannung (bis 220 Volt).

11. Bei den Versuchen mit Form b) des neuen Unterbrechers mit Schwefelsäurefüllung beobachtet man, wie auch Hr. Child³⁾ berichtet, dass während des Unterbrechens aus den Oeffnungen nach beiden Elektroden hin ein heftiger, scharf begrenzter Strom von Gasbläschen herausschiesst. Fängt man dieselben auf und untersucht sie, so erweisen sie sich überwiegend oder ganz als Knallgas. Somit wird in den Unterbrecheröffnungen eine solche Hitze entwickelt, dass nicht nur eine heftige Verdampfung, sondern sogar eine explosive Dissociation des Wasserdampfes zu Knallgas dort zu Stande kommt.

12. Wie die Anode beim Wehneltunterbrecher, so leuch-

1) A. Wehnelt, l. c. p. 264.

2) H. Goldstein, Elektr. Rev. 10. Mai. p. 294. 1899.

3) Ch. T. Child, l. c. p. 295. 1899.

ten auch bei dem neuen Unterbrecher die Unterbrecheröffnungen während des Betriebes, sobald eine grössere Selbstinduction in dem Stromkreis vorhanden ist. Dieses Leuchten rührt hier ebenso wie dort her von dem Oeffnungsextrastrom, welcher die Gasschicht durchschlägt und zum Leuchten bringt.

13. Ueber die Oekonomie des Apparates habe ich in folgender Weise Messungen angestellt: Calorimetrisch wurde die in dem Apparate entwickelte Wärme W bestimmt. Gleichzeitig wurde mit dem Wattdynamometer die in dem Apparat verbrauchte Anzahl von Watt E gemessen. Die gesammte, in den Unterbrecherstromkreis hineingeschickte Energie U wurde als das Product der am Hitzdrahtampèremeter abgelesenen Stromstärke in die Betriebsspannung berechnet.

Bei einem Versuche an Form b) des Apparates mit drei Oeffnungen von je 1 mm Querschnitt war

$$\left. \begin{array}{l} W = 450 \\ E = 511 \end{array} \right\} \text{Mittel 480 Watt,}$$

$$U = 10.70 = 700 \text{ Watt.}$$

Also wurden $480/700 = 0,68 = 68$ Proc. der Gesamtenergie im Unterbrecher verbraucht.

Besser stellte sich Form b) des Apparates.

An einem solchen mit vier Oeffnungen von 0,75 mm Durchmesser wurde bei 70 Volt Betriebsspannung

$$\left. \begin{array}{l} W = 608 \\ E = 511 \end{array} \right\} \text{Mittel 559 Watt,}$$

$$U = 13,75.70 = 952 \text{ Watt gefunden.}$$

Also wurden $559/952 = 0,56 = 56$ Proc. der Gesamtenergie im Unterbrecher verbraucht.

Bei 130 Volt Betriebsspannung

$$\left. \begin{array}{l} W = 1122 \\ E = 1207 \end{array} \right\} \text{Mittel 1164 Watt,}$$

$$U = 19.130 = 2470 \text{ Watt.}$$

Also Verlust $1164/2470 = 0,47 = 47$ Proc.

Der Unterschied der beiden letzten Versuche mit demselben Apparate erklärt sich dadurch, dass im zweiten Falle die Säure 10—15 Grad wärmer, der Widerstand also wesentlich kleiner war wie im ersten.

Noch günstigere Verhältnisse wird man bei den unter 7. erwähnten Apparaten mit halbkugeligen Elektroden erwarten dürfen.

Göttingen, Physik. Inst. der Universität.

(Eingegangen 7. Juli 1899.