

Lichtbogen mit Elektrolytkathode bei Atmosphärendruck.

Von

ALFRED WINTER, Dresden.

Mitteilung aus dem Institut für allgemeine Elektrotechnik
der Technischen Hochschule Dresden.

Mit 15 Textabbildungen.

(Eingegangen am 24. Februar 1945.)

Die Bogenentladung mit einer wäßrigen Lösung als Kathode wird als eine Glimmentladung bei Atmosphärendruck erkannt. Eine Aufteilung der Anodenglimmhaut wird beobachtet, wenn der Elektrolyt mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbunden wird. Der Lichtbogen erlischt bei einem (von den Versuchsbedingungen abhängigen) Höchstwert der Stromstärke. Es liegt hier also der Ausnahmefall vor, daß ein Lichtbogen durch Vergrößerung der Stromstärke momentan gelöscht werden kann. Als Ursache wird der durch den Umschlag in einen Feldbogen hervorgerufene Dampfstrahl angesehen. Die Umschlagstromstärke hängt ab von der Bogenlänge, dem Gasdruck, der Konzentration und der Art des Elektrolyten. Bei der Abhängigkeit vom Druck wird das einfache Gesetz gefunden: $i_l(p - a) = \text{const}$, wobei a eine von der Art des Elektrolyten abhängige Konstante ist.

Vorversuche hatten ergeben, daß es mit genügender Betriebsspannung ohne weiteres möglich ist, zwischen einer stabförmigen Metallanode und einer wäßrigen Lösung als Kathode bei Atmosphärendruck mit einer Stromstärke von der Größenordnung 0,1 A einen stabilen Lichtbogen dadurch zu erhalten, daß die Metallanode aus der Lösung herausgezogen wird. Dagegen erwies sich die Erzeugung eines Lichtbogens auf diese Weise unmöglich, sobald der Widerstand des Stromkreises soweit verringert wurde, daß der Strom des Lichtbogens 1 A oder mehr betragen hätte. Stets wurde dann der Strom durch das Herausziehen der Anode aus dem Elektrolyten sofort unterbrochen.

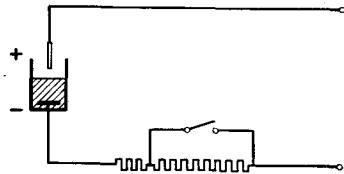


Abb. 1.

Das führte zu folgendem verblüffenden Versuch: Gemäß Abb. 1 wurde der Vorwiderstand in 2 Teile geteilt, von denen der größere kurzgeschlossen werden konnte. Der Gesamtwiderstand war so groß, daß bei einer Betriebsspannung von 1600 V ein stabiler Lichtbogen mit 50 mA, 1200 V und 8,0 mm Länge eingestellt werden konnte.

Nachdem das geschehen war, wurde der größere Teil des Widerstandes kurzgeschlossen, so daß der Strom im Lichtbogen auf 1,0 A hätte steigen können. Statt dessen erlosch er im gleichen Augenblick, und zwar, wie das Oszillogramm Abb. 2 zeigt, mit großer Plötzlichkeit in etwa 5 msec. Es liegt hier also der paradoxe Fall vor, daß eine Entladung durch eine Stromvergrößerung momentan gelöscht werden kann. Bei dem Erlöschen zeigten sich stoßartige turbulente Bewegungen des Elektrolyten. Auch durch Stromverstärkung mittels einer Kondensatorentladung konnte der Lichtbogen gelöscht werden. Aus Abb. 3 ergibt sich dabei sogar eine Löschzeit von nur 1 msec. Brannte der Bogen mit einer Bogenspannung von beispielsweise 1000 V und einer Stärke von 50 mA, so wurde ein Kondensator auf eine höhere Spannung z. B. 1600 V

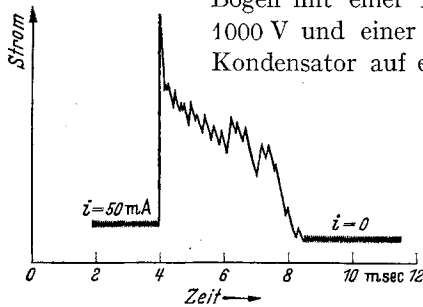


Abb. 2.

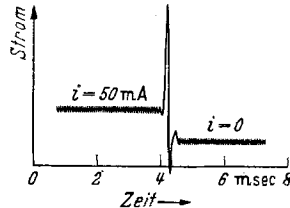


Abb. 3.

aufgeladen und dann durch schnelles Umladen durch den Lichtbogen hindurch so entladen, daß der Entladestrom in der gleichen Richtung floß wie der Bogenstrom, ihn also verstärkte. Dann ergab sich die nach Abb. 4 folgende Beziehung zwischen der erforderlichen Ladungsmenge Q des Löschkondensators und der angelegten Bogenspannung U_B . Weiterhin zeigt das Diagramm die bei gleicher Kondensatorgröße von 5000 cm notwendige Kondensatorüberspannung $U_{C\text{üb}}$. Ist diese bei kleinen Bogenspannungen bzw. kleinen Bogenlängen klein, so werden bei wachsenden Bogenspannungen für die Löschung sehr viel größere Kondensatorspannungen erforderlich.

Über die Ursache dieser Erscheinung wurde folgendes vermutet: THOMA und HEER¹ haben eine Glimmentladung mit einer Metallkathode bei Atmosphärendruck beschrieben. Sie erhielten diese durch eine kräftige Kühlung der Kathode, die den Umschlag in den Feldbogen verhinderte. Eine Glimmentladung mit einer wäßrigen Lösung als Kathode wurde bei geringen Drucken von GÜNTHERSCHULZE² untersucht. Es ergab sich im allgemeinen ein normaler Kathodenfall von 420 V, der jedoch bei Schwefelsäure beträchtlich von der Konzentration der Säure abhing.

¹ THOMA, H. u. L. HEER: Z. techn. Phys. **13**, 464 (1932).

² GÜNTHERSCHULZE, A.: Z. Elektrochem. **30**, 289 (1924).

Es ist hiernach zu erwarten, daß bei einer wäßrigen Lösung als Kathode und geringer Stromstärke auch bei Atmosphärendruck eine Glimmentladung vorliegt, da hier ja die starke Kühlung durch das Wasser ohne weiteres gegeben ist. Die Stromdichte an einer Metallkathode wurde von THOMA und HEER zu 10 A/cm^2 bestimmt. Das gibt bei 420-V-Kathodenfall eine Leistung von $4,2 \text{ kW/cm}^2$, die zu einer kräftigen Verdampfung des Wassers führt.

Feldbögen dagegen haben Stromdichten von der Größenordnung 5000 A/cm^2 . Bei einem Kathodenfall von der Größenordnung 10 V gibt das eine Leistung von 50 kW/cm^2 . Diese Leistung reicht aus, um in der Sekunde rund 35 Liter Wasserdampf/cm² zu geben. Das führt zu einem Dampfstrahl von 350 m/sec Geschwindigkeit bei Atmosphärendruck. Es wird vermutet, daß dieser beim Umschlag der Glimmentladung in die Feldbogenentladung momentan hervorbrechende Dampfstrahl die Entladung löscht. Danach ist die maximal nötige Stromstärke diejenige, bei welcher der Umschlag der Glimmentladung in die Bogenentladung möglich wird.

Damit entstand die Aufgabe, zu prüfen

1. ob der bei kleinen Stromstärken erzielbare stabile Lichtbogen eine normale Glimmentladung ist,
2. ob die Annahme der Löschung durch Umschlag in den Feldbogen richtig ist,
3. von welchen Variablen die Umschlagstromstärke abhängt.

I. Die Untersuchung des stabilen Bogens.

a) *Kathodenfall.* Die Versuche, den Kathodenfall zu ermitteln, zeigten, wie gern die Natur den Forscher übertölpelt. Es wurde das Verfahren angewendet, die Bogenspannung bei konstantem Strom in Abhängigkeit von der Bogenlänge zu messen und auf Null zu extra-

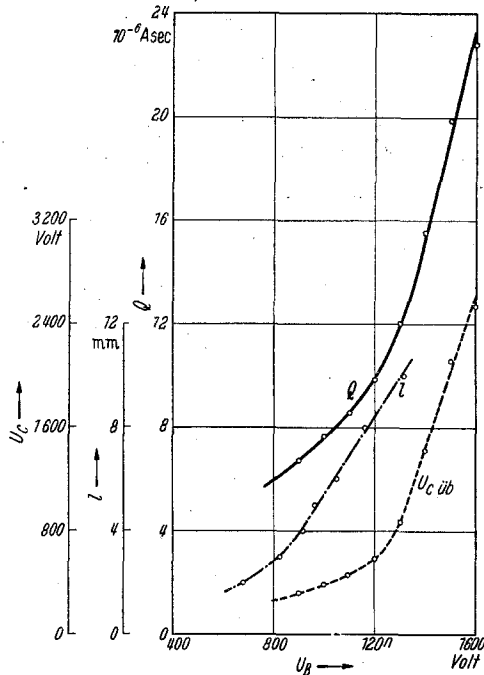


Abb. 4. Ladungsmenge Q , Kondensatorüberspannung $U_{C \text{ ü}b}$ und Bogenlänge l in Abhängigkeit von der Bogenspannung U_B bei $i = 50 \text{ mA}$ und $C = 500 \text{ cm}$.

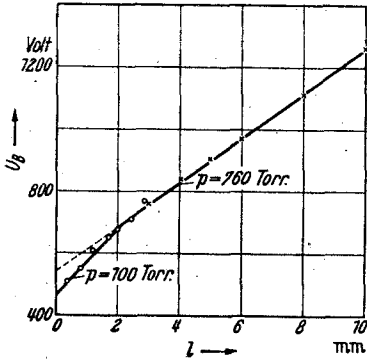


Abb. 5. Bogenspannung U_B in Abhängigkeit von der Bogenlänge l bei $i = 50$ mA.

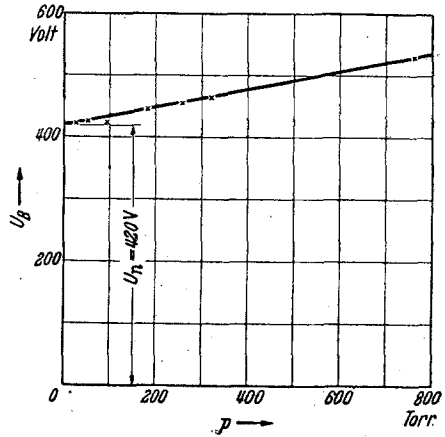


Abb. 6. Bogenspannung U_B in Abhängigkeit vom Druck p bei $l = 0$ mm.

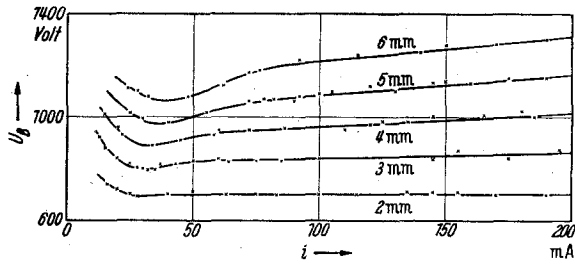


Abb. 7. Bogenspannung U_B in Abhängigkeit vom Strom i bei verschiedenen Bogenlängen und $p = 760$ Torr.

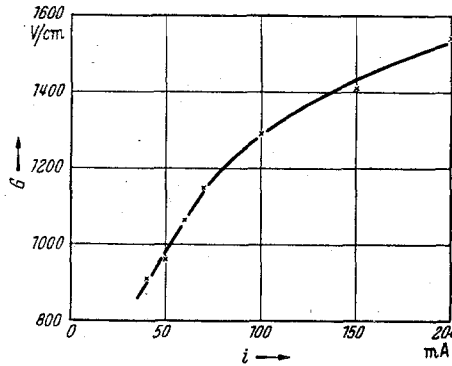


Abb. 8. Gradient bei veränderlicher Stromstärke.

polieren. Dabei konnte der Elektrodenabstand nur bis auf 2 mm verringert werden, weil bei geringeren Abständen der Elektrolyt durch die Feldkräfte an die Anode gerissen wurde. Die Meßpunkte lagen sehr gut auf einer Geraden und führten, auf Null extrapoliert, zu einem

Kathodenfall von 540 V. Dieser Wert erschien uns unglaublich. Um nun in das unzugängliche Gebiet von weniger als 2 mm Abstand zu kommen, wurde der Luftdruck verringert, denn eine Druckverringerung ist ja einer Abstandsvergrößerung äquivalent. Dabei ergab

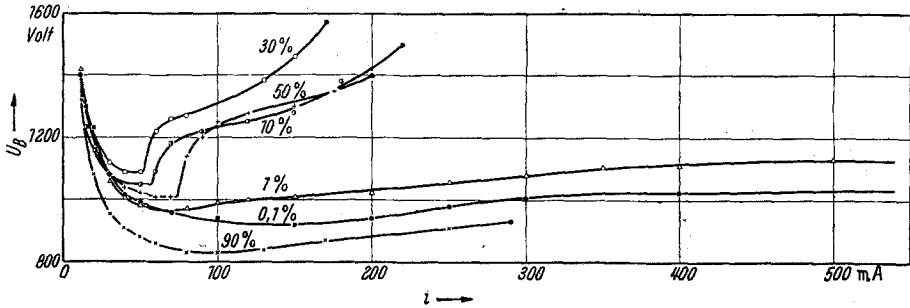


Abb. 9. Bogenspannung U_B in Abhängigkeit vom Strom i bei verschiedenen H_2SO_4 -Lösungen und $l = 6$ mm.

sich alsbald, daß gemäß Abb. 5 die Kurve $U_B = f(l)$ aus 2 Stücken besteht, einem steilen bei kleinen Abständen und einem flachen bei größeren. Das steile Stück war wie angegeben bei Atmosphärendruck nicht einstellbar. Wurde dieses auf den Abstand Null extrapoliert,

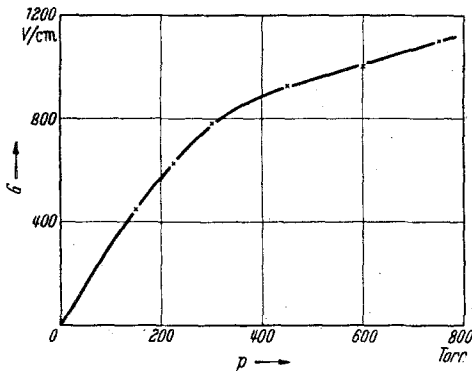


Abb. 10. Gradient bei veränderlichem Druck.

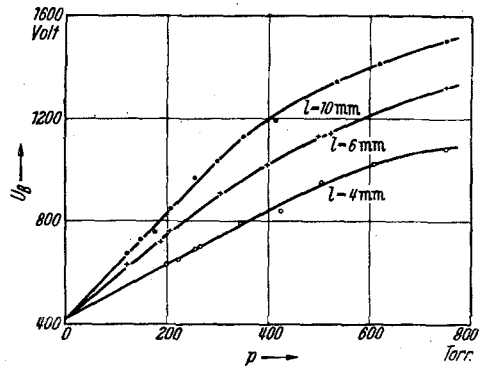


Abb. 11. Bogenspannung U_B in Abhängigkeit vom Druck p bei verschiedenen Bogenlängen und $i = 50$ mA mit 30%iger H_2SO_4 -Lösung.

so ergab sich ein Kathodenfall von 460 V. Daraufhin wurde bei verschiedenen Drücken und Bogenlänge gleich Null $U_{B \min}$ ermittelt. Abb. 6 zeigt das Ergebnis: den früher von GÜNTHERSCHULZE bei geringen Drücken gemessenen normalen Kathodenfall von 420 V.

b) *Bogenfeldstärke.* Über die Abhängigkeit der Bogenfeldstärke von den verschiedenen Variablen wurde folgendes gefunden: Aus Abb. 7, die die Beziehung zwischen verschiedenen Bogenstromstärken und der erforderlichen Bogenspannung bei Atmosphärendruck und

veränderlichen Bogenlängen mit einer 10%igen H_2SO_4 -Lösung als Kathode wiedergibt, wurde der Gradient ermittelt. Abb. 8 zeigt nun bei wachsender Stromstärke eine Zunahme desselben, während bei Glimmentladungen mit Metallkathoden bisher immer ein Fallen beobachtet worden ist. Als Grund des Anstieges muß hierbei der aus der Kathode hervorbrechende Dampfstrahl angesehen werden, der die Entladung

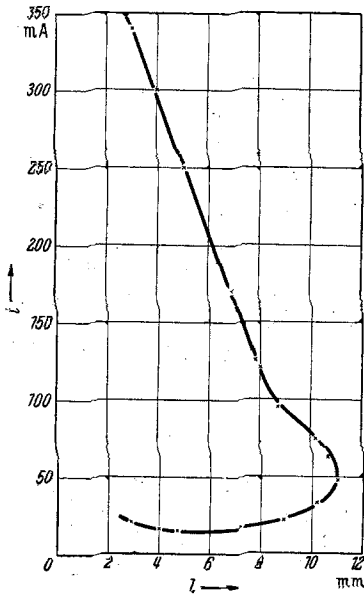


Abb. 12. i_{\max} und i_{\min} in Abhängigkeit vom Abstand l bei $p = 760$ Torr und 10%iger H_2SO_4 -Lösung.

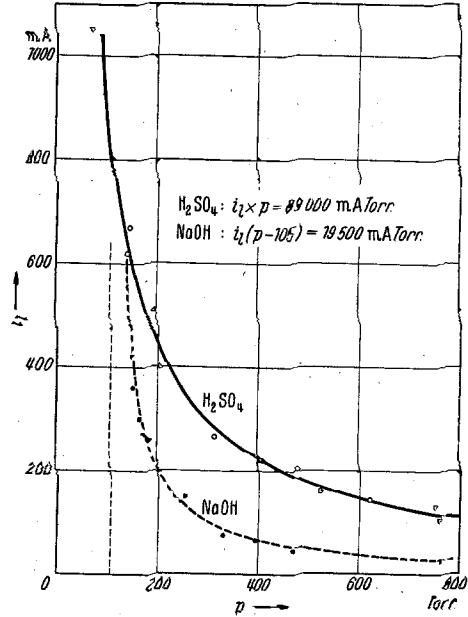


Abb. 13. Löschstromstärke i_1 in Abhängigkeit vom Gasdruck bei 30%igen Lösungen und Bogenlänge $l = 6$ mm.

erschwert, was zu einer Zunahme des Gradienten führt. Gegenüber Abb. 7 sind in Abb. 9 die Kennlinien bei konstant gehaltener Bogenlänge mit der Konzentration als Parameter dargestellt. Dabei fällt einmal das schnelle Anwachsen von U_B nach dem Spannungsminimum bei den Konzentrationen 10, 30 und 50% auf und zum anderen, daß diejenige Lösung die höchsten Werte der Bogenlänge besitzt, die das Maximum an Leitfähigkeit aufweist. Der Anstieg ist darauf zurückzuführen, daß die Entladung, was auch jedesmal beobachtet werden konnte, in eine andere Bogenform umschlägt. Schließlich gibt Abb. 10 mit 11 eine Übersicht über die Feldstärke bei veränderlichem Druck. Sie steigt wie bei anderen Glimmentladungen mit dem Druck an.

c) Aufteilung der Anodenglimmhaut. Eine besondere Erscheinung der Anodenglimmhaut wurde beobachtet, wenn das Metall Kathode und

die wäßrige H_2SO_4 -Lösung Anode war. Bei Atmosphärendruck und einer Stromstärke von 50 mA wurden mehrere scharf abgegrenzte konzentrische Ringe mit symmetrisch verteilten Perlen auf der Elektrolytoberfläche sichtbar, die nach Wahl der Stromstärke rotierten oder stillstanden. GÜNTHERSCHULZE, BÄR und BETZ¹ haben ähnliche Figuren, deren Zustandekommen mit Hilfe des Minimumprinzips erklärt wird, bei Glimmentladungen in Wasserstoff und Stickstoff bei niedrigen Drucken gefunden.

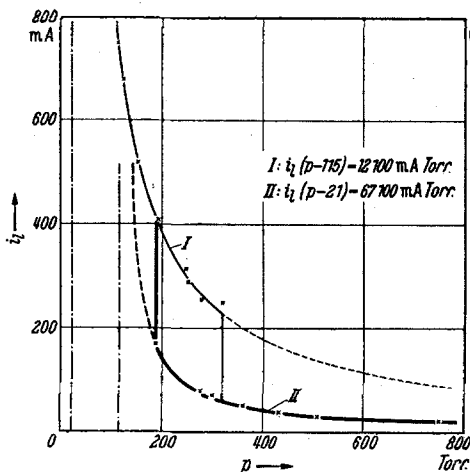


Abb. 14. Löschstromstärke i_1 in Abhängigkeit vom Gasdruck p bei 30%iger $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ und Bogenlänge $l = 6$ mm.

II. Die Umschlag- oder Löschstromstärke.

a) *Einfluß der Bogenlänge.* Abb. 12 zeigt die Grenzstromstärke in Abhängigkeit vom Abstand bei konstanter Betriebsspannung von 1900 V. Sie nimmt bei wachsendem Abstand l sehr rasch ab, bis der maximale Abstand der Entladung bei etwa 50 mA erreicht ist. Gleichzeitig gibt der weitere Kurvenverlauf die Minimalstromstärken bei vorliegenden Versuchsbedingungen an. Die Kurve begrenzt somit das Gebiet, in dem überhaupt ein stabiler Lichtbogen mit Elektrolytkathode möglich ist.

b) *Einfluß des Gasdruckes.* Abb. 13 und 14 zeigen die Ergebnisse. Danach bildet die Löschstromstärke i_1 über p sehr genau eine gleichseitige Hyperbel, deren Asymptoten bei H_2SO_4 das Koordinatenkreuz sind, während bei NaOH die eine Asymptote durch einen Druck von 105 Torr gebildet wird. Ferricyankalium weist eine Sonderheit auf.

¹ GÜNTHERSCHULZE, A., W. BÄR u. H. BETZ: Z. Phys. **109**, 293 (1938).

Die Löschstromstärken ergeben bei niedrigen Drucken die Hyperbel I, die durch die Gleichung

$$i_l(p - 115) = 12100 \text{ mA Torr}$$

bestimmt ist, während bei höheren Werten von p die Hyperbel II gilt,

$$i_l(p - 21) = 67100 \text{ mA Torr.}$$

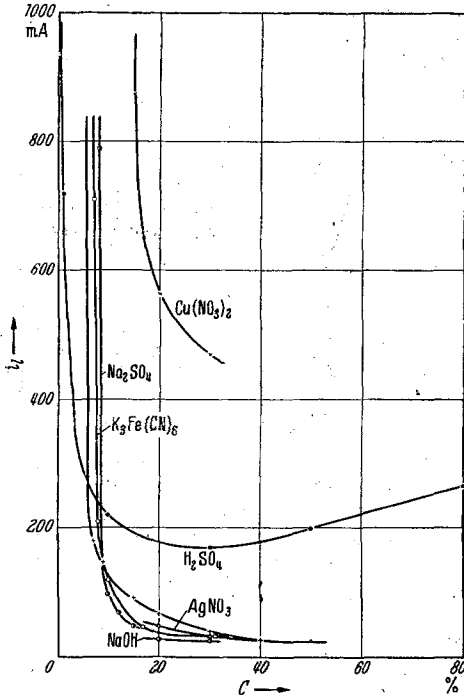


Abb. 15. Löschstromstärke i_l in Abhängigkeit von der Konzentration C bei verschiedenen Elektrolyten, Bogenlänge $l = 6 \text{ mm}$ und $p = 760 \text{ Torr}$.

Der Übergang von I nach II erfolgte jedoch niemals bei einem bestimmten Druck, sondern, wie verschiedene Meßpunkte zeigen, unstetig.

c) *Einfluß der Konzentration und Art des Elektrolyten.* Darüber gibt Abb. 15 Aufschluß. Hiernach hängt die Umschlagstromstärke von der Leitfähigkeit des Elektrolyten ab. Wo diese ihr Maximum hat, liegt das Minimum der Löschstromstärke. Ferner hängt diese von der Art des Elektrolyten ab. Bei H_2SO_4 liegt ihr Minimum bei 170 mA, bei NaOH und $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ dagegen bei 25 mA.