

Zur Theorie der Bogenentladung.

Von **H. A. Schwab** in München.

(Eingegangen am 31. März 1932.)

Die an Hand der Glimmentladung und des Niedervoltbogens vorstehend entwickelte Theorie, betreffend die Beeinflussung der Entladung durch etwaige Rekombinationsvorgänge, wird auf den Kohlebogen ausgedehnt und zur Deutung bisher theoretisch ungeklärter Versuchsergebnisse angewandt.

1. Die vorstehenden Betrachtungen lassen sich auf die Bogenentladung übertragen. Als unterschiedlich zur Glimmentladung sind die wesentlich größere Stromdichte und stärkere Ionisierung hervorzuheben, welche Umstände — einzeln betrachtet — jeder für sich einen gesteigerten Effekt erwarten lassen; und zwar einerseits infolge erhöhter Richtwirkung auf die Verteilung der A -Komponenten, andererseits durch vermehrte Rekombinationshäufigkeit. Genauer genommen, erweist sich der Einfluß einer stärkeren Ionisierung allerdings als ein doppelter. Neben der Erhöhung der Rekombinationshäufigkeit steht eine Verminderung der Richtwirkung, da ja die relative Strömungsgeschwindigkeit der Ladungsträger gegeneinander, bei gleichbleibender Stromdichte, mit wachsender Ionendichte abnimmt. Gleiche Dichte für positive und negative Ionen vorausgesetzt, ändert sich indessen der erste Einfluß mit dem Quadrat, der zweite hingegen direkt proportional der Ionendichte, und es resultiert eine Zunahme der inneren EMK in der angenommenen Weise. Demgegenüber steht die größere Gasdichte und damit ein höherer innerer Widerstand, der — im Vergleich zum Niedervoltbogen — eine völlige Feldumkehr erschwert.

2. Bekannt sind nun z. B. die Schwierigkeiten, die einer theoretischen Erklärung der erforderlichen Ionenbildung — innerhalb der Säule eines Kohlebogens — entgegenstehen. Die Notwendigkeit der letzteren, wie auch die dafür vorhandenen theoretischen Möglichkeiten sind von Compton¹⁾ eingehend diskutiert worden.

Näherliegend ist, auch hier die Ursache der Ionenbildung in einer zusätzlichen Beschleunigung der Elektronen zu suchen, wie sie für den Niedervoltbogen, als Folge der sich ausbildenden inneren EMK in Erscheinung tritt, wobei aber nunmehr der Vorgang der Ionenbildung und der Rekombination räumlich ungetrennt in dem gleichen Bogenabschnitt vor sich gehen, und somit eine direkte Messung der inneren Hilfsspannung unterbunden wird. Rein qualitativ lassen sich die bestehenden Schwierigkeiten

¹⁾ K. T. Compton, Phys. Rev. **21**, 266, 1923.

überwinden, durch Gleichsetzung des (auf Grund geordneter Rekombination der Entladung wieder zugeführten) Energiebetrages mit dem Fehlbetrag, der zur Ionenbildung durch Elektronenstoß zusätzlich aufgebracht werden muß. Das Ganze gleicht wiederum dem oben geschilderten Kreisprozeß.

In dieser Richtung geht bereits Nottingham¹⁾ einen Schritt weiter, indem er Ionenbildung durch Elektronenstoß und eine ausreichende Elektronentemperatur annimmt. Gestützt wird seine Vermutung durch den experimentellen Nachweis hinreichender Elektronengeschwindigkeit, während die theoretische Behandlung nicht ohne eine neue Hypothese auskommt.

Der Grundgedanke besteht dabei in der Annahme, daß die von einem Elektron längs einer mittleren, freien Weglänge durch die Einwirkung des Feldes aufgenommene Energie, nur zum Teil durch Stoß wiederum abgegeben wird, zum anderen Teil aber dem Elektron verbleibt, und so in Summierung über mehrere Weglängen eine (ungeordnete) Temperaturbewegung von wesentlich höherer, mittlerer Geschwindigkeit zur Folge haben kann als sie durch Beschleunigung längs einer einzigen Weglänge dem Elektron erteilt würde. Diese Schlußfolgerung erweist sich indessen als unhaltbar, wenn man bedenkt, daß bei weiterhin wachsender Energieabgabe durch Stoß, die resultierende Energieaufnahme sämtlicher Elektronen aus dem Felde um so kleiner wird, je größer die mittlere Geschwindigkeit der ungeordneten Bewegung ist, so daß sehr bald ein Grenzwert für die letztere erreicht wird, der nicht mehr durch weitere Energiezufuhr aus dem Felde überschritten werden kann. Verantwortlich ist der Umstand, daß die auf Grund ihrer ungeordneten Bewegung gegen das Feld anlaufenden Ladungsträger keine Beschleunigung im positiven Sinne mehr erfahren.

Die Tatsache der gemessenen, hohen Elektronengeschwindigkeit (von mehreren Volt) verbleibt und kann nunmehr als erste Bestätigung der neu gegebenen Anschauung gelten.

3. Eine weitere Schwierigkeit lag bisher in der theoretischen Begründung der statischen Bogencharakteristik, gleichbedeutend einer Beantwortung der Frage: Aus welchem Grunde nimmt der Widerstand der Säule mit wachsender Stromstärke ab?

Die Ursache findet sich jetzt als eine Folge der doppelten Abhängigkeit der inneren Hilfsspannung von der Stärke der Ionisierung, wie von der Stärke der Richtwirkung auf die Verteilung der *A*-Komponenten (s. oben). Beide nehmen mit wachsender Stromdichte zu und ergeben eine immer

¹⁾ W. B. Nottingham, Journ. Frankl. Inst. 206, 43, 1928.

mehr hervortretende, gerichtete Rekombination, damit eine starke Erhöhung der inneren Hilfsspannung, und also eine „scheinbare“ Abnahme des Säulenwiderstandes. Vorausgesetzt ist lediglich eine mit der Stromstärke zunehmende Stromdichte, entgegen der Annahme eines über den ganzen Querschnitt konstanten und von der Stromstärke unabhängigen Wertes, die nur als erste Annäherung gelten kann. Zur Begründung sei auf Messungen von Banderet¹⁾ verwiesen. Ferner verlangen auch die Diffusionsgesetze in Anwendung auf die radiale Verteilung der Ladungsträger eine stets maximale und mit der Gesamtzahl der Ionen zunehmende Dichte in der Bogenachse.

Wie bereits bemerkt, handelt es sich bei der Abnahme des Säulenwiderstandes nur um eine „scheinbare“ Widerstandsänderung, hervorgerufen durch die Änderung der inneren Hilfsspannung. Bezeichnen wir des weiteren die innere Hilfsspannung der Säule pro Längeneinheit mit E_s , den entsprechenden scheinbaren Widerstand mit R_s , und die Säulenlänge mit l , so gilt:

$$IR_s l = E_s l + IR'_s l,$$

worin R'_s den wahren Ohmschen Widerstand der Säule ebenfalls auf die Längeneinheit bezogen und I die Stromstärke darstellt. An den Klemmen gemessen, wird E_s als Hilfsspannung naturgemäß negativ, und die Abnahme der Brennspannung mit wachsender Stromstärke ist in Zusammenfassung des Gesagten auf die dargelegte Abhängigkeit $E_s = F(I)$ zurückzuführen.

4. Bezüglich der dynamischen Charakteristik folgt aus der Abhängigkeit der inneren Hilfsspannung von der Richtung des Entladungsstromes, daß ein Widerspruch mit der Erfahrung, wonach Strom und Brennspannung eines Wechselstrombogens stets zu gleicher Zeit den Nullwert passieren, durch die Einführung von E_s nicht entstanden ist. Zur Erfassung des trotzdem unter 1 gelegenen Leistungsfaktors steht aber nun eine weitere Möglichkeit in der Berücksichtigung der Ionendichte zur Verfügung, die ihrerseits in der Frequenz des Entladungsstromes Schwankungen unterworfen ist. Wesentlich ist dabei, daß die Änderung der Ionendichte mit dem Entladungsstrom nicht in Phase verläuft, sondern — trägen Verlaufes — nachhilt; und zwar um so mehr, je höher die Frequenz ist. Auch E_s als Funktion der Ionendichte wird hiervon betroffen, und eine Deformierung der Spannungs-Zeit-Kurve ist die notwendige Folge. Näherungsweise dürften sich die bisherige Begründung dieser Deformierung (Temperaturschwankungen, verbunden mit einer Entionisierung während der Löschpause) und der neu hinzukommende Einfluß in die Gestaltung der Spannungs-

¹⁾ E. Banderet, Dissertation Basel 1912.

Zeit-Kurve bis zum Zündgipfel bzw. die Einsattelung zwischen Zünd- und Löschgipfel teilen.

Interessant ist weiterhin das Zusammentreffen zweier Resultate aus den Messungen Duddells¹⁾ am Gleichstromkohlebogen mit überlagertem Wechselstrom. Und zwar findet sich neben einer Zunahme des scheinbaren Widerstandes mit der Frequenz eine gleichzeitige Zunahme des Leistungsfaktors. Jede Erhöhung des ersteren als Folge einer Deformierung der Strom-Zeit- bzw. Spannungs-Zeit-Kurve, oder auch zufolge einer Phasenverschiebung, wie sie in diesem Falle tatsächlich beobachtet wird, würde aber auf der bisherigen Grundlage ein gleichzeitiges Sinken des Leistungsfaktors bedingen. Die nunmehrige Begründung ergibt sich wie folgt:

Maßgebend für die Größe der Phasenverschiebung ist diejenige Komponente (E_j) der inneren Hilfsspannung (E_s), welche dem Produkt „*Änderung der Rekombinationshäufigkeit (Ionendichte) durch den Wechselstrom mal Richtwirkung des Gleichstromes*“ entspricht, und die demzufolge in Phase mit der Ionendichte auftritt, während die zweite Komponente (E_i) von E_s , gemäß der „*durch den Gleichstrom bedingten Ionendichte mal Richtwirkung des Wechselstromes*“ in Phase mit dem Strom verläuft. Zu beachten ist indessen, daß jede innere Hilfsspannung, also z. B. auch ein in Phase mit dem Strom liegender Wert, zufolge der örtlichen Lage, an den Klemmen des Bogens gemessen, 180° phasenverschoben erscheint. Der Vollständigkeit halber seien die dritte und vierte Komponente ebenfalls erwähnt, wenngleich sie als Konstante bzw. als vernachlässigbar klein hier ausscheiden. Es sind dies die Produkte „*Ionendichte mal Richtwirkung*“, einerseits unter Benutzung der durch den Gleichstrom bedingten Werte für beide Faktoren, beider Wechselstromwerte andererseits.

Die vorgenommene Zergliederung der inneren Hilfsspannung läßt nun erkennen, daß die aus der äußeren EMK (E_a) und der inneren Hilfsspannung (E_s) resultierende Klemmenwechselspannung (E_k) für sehr kleine Frequenzen, zufolge der verschwindenden Phasendifferenz zwischen Strom und Ionendichte, annähernd gleich der algebraischen Summe ihrer Bestandteile ($E_{a_0} + E_{i_0} + E_{j_0}$) wird, also etwa 180° phasenverschoben zum Strome auftritt.

Für mittlere Frequenzen werden die Verhältnisse durch die nunmehr merkliche, bereits früher besprochene Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Ionendichte bestimmt. Die gleichzeitige Drehung des resultierenden Hilfsspannungsvektors aus der ursprünglichen Lage verlangt jetzt eine vektorielle Addition des ersteren zur äußeren EMK und ergibt

¹⁾ W. Duddell, Phil. Trans. (A) **203**, 305, 1904.

eine mit wachsender Frequenz abnehmende Phasenverschiebung zwischen Strom und Klemmenspannung. Gleichbedeutend ist eine *Zunahme des Leistungsfaktors*. Da außerdem die Ionendichte mit zunehmender Frequenz einem konstanten Mittelwert zustrebt, ihre periodische Änderung also ebenfalls abnimmt, wird die an erster Stelle genannte Komponente von E_s auch numerisch kleiner, was seinerseits gleichbedeutend mit einer *Zunahme des Scheinwiderstandes* ist. Damit sind aber die experimentellen Ergebnisse qualitativ abgeleitet worden.

Für unendlich hohe Frequenz folgt $E_j = 0$, $E_{k\infty} = E_{a\infty} + E_{i\infty}$. Die Phasenverschiebung ist Null und der scheinbare Widerstand hat seinen Maximalwert erreicht.

Selbstverständlich ist für alle vorausgehenden Betrachtungen die völlige Konstanz der zusätzlichen Gleichstrombelastung. Wachsender Gleichstrom bewirkt durch Vergrößerung von E_s die bekannt starke Abnahme des Wechselstromwiderstandes. Insbesondere ergibt sich in Übereinstimmung mit der Beobachtung ($R = aI^{-1} + bI^{-2}$) der scheinbare Wechselstromwiderstand (R) als in doppelter Weise von der Gleichstromstärke (I) abhängig; wiederum entsprechend dem Verhalten der Summanden E_i und E_j von E_s . Während nur einer der Faktoren von E_i sich als abhängig von I erweist, ist in bezug auf $E_j = f(I)$ zu beachten, daß neben der „Richtwirkung durch den Gleichstrom“ auch die „Änderung der Rekombinationshäufigkeit durch den Wechselstrom“ in gleicher Weise von jeder Änderung der Gleichstrombelastung (bzw. Gleichstrom-Vorionisierung) betroffen wird.

5. Ausgehend vom Glimmbogen bedingt zunehmender Entladungsstrom gleichfalls eine Änderung der inneren Hilfsspannung und damit eine weitere Zunahme des Entladungsstromes. Hand in Hand mit der letzteren geht eine sekundäre, innere Hilfsspannung usw. Die Stabilität des Bogens ist dabei solange gewährleistet, als zufolge des Gesamtwiderstandes (Vorschalt- plus Bogenwiderstand) die sekundäre Zunahme von E_s die primäre unterschreitet. *Nach Überschreitung der damit gegebenen Grenze wächst die innere Hilfsspannung bzw. fällt der Säulenwiderstand sprunghaft* bis zu einem Wert, der nunmehr in erster Linie durch das Gleichgewicht zwischen Ionisierung und Rekombination reguliert wird, welches dem weiteren Anwachsen der Ionendichte eine obere Grenze setzt.

Hieraus folgt zwanglos die gleichzeitige Kontraktion der Säule. Entsprechend einem Maximalwert der Stromdichte in der Achse des Glimmbogens geht auch dortselbst zuerst die Stabilität verloren. Die damit einsetzende ungleiche Verteilung des Scheinwiderstandes über den bisherigen Querschnitt fordert aber eine neue Stromdichteverteilung im Sinne

der Beobachtung. Auch in Ergänzung zu dem unter 3. Gesagten, bezüglich der Stromdichteverteilung im normalen Bogen, ergibt sich jetzt eine weitere Begründung der dortigen Voraussetzung. Und zwar macht die Abhängigkeit der Ionendichte von der Rekombinationshäufigkeit innerhalb des Bogens, nicht aber innerhalb der angrenzenden Querschnittszonen, und das damit für beide Abschnitte verschiedenartige Verhalten von E_s , den mit der Stärke des Entladungsstromes zunehmenden Bogenquerschnitt und eine annähernd, nicht absolut konstante Stromdichte verständlich.

6. Zum Schluß drängt sich die Frage auf: Gibt es weitere Gebiete, in denen die Verhältnisse ähnlich liegen; in denen also durch geordnete Rekombination eine innere EMK hervorgerufen wird?

Unter Beschränkung auf die Bogenentladung mögen deshalb noch zwei elektromotorische Kräfte besprochen werden, soweit sich ihre Begründung in der vorgehend geschilderten Weise geben läßt.

Eine Zone vorherrschender Rekombination, identisch mit der lebhaften Neutralisation sämtlicher gegen die Kathode geschleuderter Kationen, findet sich insbesondere in unmittelbarer Nähe der Kathode. In Berücksichtigung der Richtwirkung des Entladungsstromes auf die Verteilung der A -Komponenten müßte sich hier demgemäß eine besonders hohe innere Hilfsspannung ausbilden. Das Ergebnis zeigt sich deutlich in dem Auftreten negativer Werte für die elektromotorische Gegenkraft Duddells an der Kathode.

Völlig andere Verhältnisse herrschen an der Anode der Bogenentladung, woselbst ein Überwiegen der Rekombination über die Ionenneubildung nicht ohne weiteres angenommen werden kann. Indessen ist gerade nächst der Anode, zufolge der Temperaturverteilung, am ehesten eine merkliche thermische Ionisierung im Sinne Sahas¹⁾ denkbar, die ihrerseits bei Erreichung einer genügenden Ionendichte ebenfalls zu einer Wiedervereinigung von Ladungsträgern führt, ohne aber die Forderung einer gleichzeitigen Ionenbildung durch Elektronenstoß an den Entladungsstrom zu stellen. Das Resultat dieser Rekombination in Zusammenhang mit der Richtwirkung des Entladungsstromes ist das gleiche. Entsprechend wird für eine Effektkohle als Anode, in Umkehrung der Verhältnisse des Reinkohlebogens, tatsächlich eine negative Gegen-EMK (E_A) auch an der Anode beobachtet [vgl. Duddell, Hagenbach und Mitarbeiter²⁾].

München, den 23. März 1932.

¹⁾ M. N. Saha, Phil. Mag. 40, 472, 1920.

²⁾ A. Hagenbach u. R. Percy, Arch. scienc. phys. et nat. 4, 363, 1922; A. Hagenbach u. M. Wehrli, ZS. f. Phys. 20, 96, 1923; 26, 23, 1924.