

Über die Vorgänge an der Anode eines zischenden Homogenkohlebogens.

Von **W. Weizel**, Bonn, und **J. Fassbender***), im Felde.

Mit 5 Abbildungen. (Eingegangen am 19. Oktober 1942.)

Der Ansatz eines ruhig brennenden Kohlebogens liegt auf der Anode fest. In ihm wandert ein viel kleinerer Brennfleck herum. Im Zischbogen bewegt sich auch der Ansatz auf der Anode. In den Brennflecken werden Stromdichten von mehreren tausend Amp/cm² erreicht. Die Spannung gegen die Zeit aufgetragen, zeigt beim Zischbogen eine Sägezahnkurve. Die Ursachen dieser Erscheinungen werden erklärt.

Noch vor kurzer Zeit hat sich das Interesse bei den Lichtbögen vorwiegend auf die Quecksilberbögen, insbesondere bei höheren Drucken, konzentriert. Seit einigen Jahren jedoch erfreuen sich auch die Kohlebögen wieder größerer Beachtung. Insbesondere Finkelnburg hat in mehreren Arbeiten¹⁾ die hochbelasteten Kohlebögen, die sogenannten Hochstrombögen, untersucht. Bei höherem Strom machen sich zwei Erscheinungen,

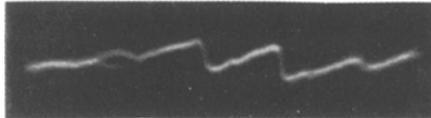


Fig. 1. Spannungszillogramm des zischenden Bogens;
nach oben Spannung, nach rechts Zeit.

die von der Anode herrühren, am Bogen immer wesentlicher bemerkbar: Das Zischen des Homogenkohlebogens und die Ausbildung des anormalen Anodenfalles, der mit einer großen aus der Anode hervorbrechenden anodischen Flamme verbunden ist. In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden, etwas zur Klärung der Vorgänge an der Anode beizutragen, insbesondere das Zischen genauer zu verfolgen.

Nimmt man mit einem Kathodenstrahloszillographen die Spannung eines zischenden Bogens gegen die Zeit auf, so erhält man ein Diagramm

*) Die Arbeit ist ein Teil der Dissertation von J. Fassbender, Bonn 1942.

¹⁾ Handb. d. Lichttechn., S. 137ff., Berlin 1938; W. Finkelnburg, ZS. f. Phys. **112**, 305, 1939; **113**, 562, 1939; **116**, 214, 1940; ZS. f. techn. Phys. **21**, 311, 1940; Naturwissensch. **28**, 576, 1940.

nach der Art der Fig. 1. Es finden also Spannungsschwankungen statt, die einen einigermaßen periodischen Verlauf zeigen. Es liegt nun nahe zu vermuten, daß an der Anode sich Vorgänge abspielen, die sich mit der Zeit sehr schnell ändern. Um sie direkt zu beobachten, wurde die Anode gefilmt.

Filmaufnahmen der Anode eines Zischbogens. Lichtbögen sind der direkten visuellen Beobachtung wie auch der Photographie wegen ihrer außerordentlichen Helligkeit, wegen der großen Helligkeitskontraste nur schwer zugänglich, wenn rasch ablaufende Veränderungen untersucht werden sollen. Aufnahmen mit gewöhnlichen Kinokameras lieferten kein interessantes Ergebnis, sondern zeigten nur einfach das Bild der glühenden Anode. Dasselbe war bei einer Leicaaufnahme der Fall, die mit $\frac{1}{500}$ Sek. Belichtungszeit gemacht wurde. Dies rührt offenbar daher, daß die Belichtungsdauer noch zu groß ist und deshalb, da die Leica mit Schlitzverschluß arbeitet, von den Einzelvorgängen noch nichts zu sehen ist. Es mußte also versucht werden, mit einfachen Mitteln eine Kamera hoher Bildzahl zu bauen und mit ihr die Anode zu filmen.

In eine lichtdichte Kiste wurde ein Motor mit einer Riemenscheibe eingebaut, auf der der Film befestigt wurde. In die Stirnseite der Kiste war ein Objektiv eingebaut, das die Anode auf den Film abbildete. Dicht vor ihm saß ein feiner fester Schlitz, vor dem eine Pappscheibe mit 40 Schlitzen rotierte, so daß der Film nur belichtet wurde, wenn der feste Schlitz von einem der Schlitze in der Scheibe überdeckt wurde. Die Umdrehungszahl und Schlitzbreite der Pappscheibe wurden so eingerichtet, daß die Belichtungszeit etwa $\frac{1}{150000}$ Sekunden betrug. Die Drehzahl des Filmträgers wurde so einreguliert, daß sich während der Belichtungszeit der Film um nicht mehr als $\frac{1}{10}$ mm fortbewegte. Der Abstand der einzelnen Schlitze auf der rotierenden Scheibe war dabei so groß, daß die einzelnen Bildchen einen Abstand von etwa 10 mm hatten. Die Kamera lieferte etwa 1500 Bilder in der Sekunde. In das Objektiv war noch ein Zentralverschluß eingebaut, mit dem man die Filmaufnahme während $\frac{1}{50}$ Sekunde laufen lassen konnte, wobei man ungefähr 30 Bilder auf dem Film erhielt. Eine Skizze der Kamera gibt die Fig. 2.

Mit dieser Anordnung wurde zunächst ein Homogenkohlebogen verhältnismäßig geringer Stromstärke untersucht. Hierfür, wie auch für die folgenden Versuche wurden die Azur-S-Kohlen der Ringsdorff-Werke Mehlem von 12 cm Durchmesser verwendet. Die Stromstärke betrug etwa 30 Amp. und wurde natürlich einer Batterie entnommen. Der Bogen setzt, wie schon bisher bekannt, an einem kleinen Gebiet der Anodenstirnseite an

dessen Fläche etwa 15 mm^2 beträgt. Dies entspricht einer Stromdichte von etwa 200 Amp./cm^2 . Der Bogen brennt völlig geräuschlos und die Ansatzstelle des Bogens liegt auf der Kohle fest bzw. bewegt sich nur ganz langsam. Die Filmaufnahme der Fig. 3 läßt jetzt interessante Einzelheiten erkennen. Da diese auf der Reproduktion weit weniger gut als auf dem Originalfilm selbst sichtbar sind, ist in Fig. 3a noch einmal eine Zeichnung des Filmstreifens wiedergegeben. Die Reihe der schwachen hellen Punkte auf der linken Seite sind die Bilder des Bogenansatzpunktes an der Kathode,

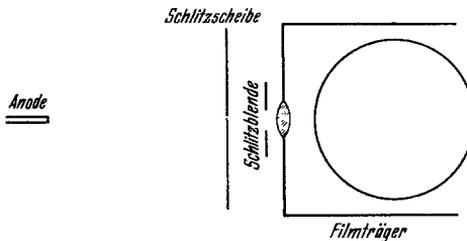


Fig. 2.

die helleren Flecke rechts die Bilder des Ansatzes an der Anode. Die gegenseitige Lage der Ansatzstellen an den Elektroden ist immer dieselbe, woraus hervorgeht, daß der Bogen immer an derselben Stelle der Anode ansetzt. Innerhalb des anodischen Ansatzes zeichnet sich aber ein Brennfleck von höchstens 1 mm^2 Fläche durch bedeutend höhere Helligkeit deutlich ab, der sich mit ziemlich großer Geschwindigkeit ohne erkennbare Regelmäßigkeit in dem hochoberhitzten Ansatzgebiet herumbewegt. Daß dieser Brennfleck nicht einzelne Stellen bevorzugt, sondern im ganzen Ansatzgebiet umherläuft, läßt darauf schließen, daß es sich hierbei nicht um zufällige stärkere lokale Erhitzungen handelt, sondern um die eigentliche momentane Ansatzstelle der Entladung also um das, was man als Brennfleck zu bezeichnen hat. In ihm haben wir dann Stromdichten von mindestens 3000 Amp./cm^2 .

Der wirkliche Brennfleck entsteht vermutlich durch Kontraktion der Entladung vor der Elektrode nach dem von Weizel, Rompe und Schön ¹⁾ entwickelten Mechanismus, während das größere hochoberhitzte Gebiet derjenige Teil der Anode ist, auf welchem der Brennfleck sich bewegt, und der deshalb auf eine höhere Temperatur kommt als die übrige Stirnfläche der Anode.

¹⁾ W. Weizel, R. Rompe u. M. Schön, ZS. f. Phys. 115, 179, 1940.

Nimmt man von diesem Bogen ein Spannungs-Zeit-Oszillogramm auf, so findet man keine Spannungsschwankungen.

Erhöht man die Stromstärke, so schlägt der ruhig brennende Bogen in eine geräuscherzeugende Form über. Unter den mannigfaltigen Geräuschen die man an Lichtbögen beobachten kann, können drei Typen leicht herausgearbeitet werden.

Ein Bogen mit ziemlich großem Elektrodenabstand neigt zum Knattern. Dieses Geräusch ist von dem eigentlichen Zischen leicht zu unterscheiden und rührt daher, daß die aus den Kohlen hervorbrechenden Flammen durch Konvektion und magnetische Kräfte nach Art des Hörnerblitzableiters abgetrieben werden. Einen knatternden Bogen erhält man leicht, wenn beide Elektroden schräg nach oben geneigt sind und einen Winkel von etwa 90° bilden. Eine Filmaufnahme eines solchen knatternden Bogens wurde früher¹⁾ gezeigt und diskutiert.

Von dieser Form des Knatterns scharf zu unterscheiden ist ein Knattern, das man an Kohlen erhalten kann, die zwar ohne Docht sind und deshalb homogen, aber ganz aus Effektmaterial bestehen. Der Vorgang des Knatterns hat bei diesen besonderen Kohlen dieselbe Ursache wie das Zischen an der gewöhnlichen Homogenkohle, das wir sogleich genauer analysieren. Alle Erscheinungen spielen sich nur langsamer ab, weshalb statt des Zischens ein Knattern hörbar wird.

Bei großer Stromstärke geht der ruhig brennende Bogen an Homogenkohlen in den Zischbogen über. Der Umschlag findet nach Finkelnburg nicht bei einem ganz bestimmten Punkte statt, sondern es gibt ein Gebiet, wo man beide Formen beobachten kann. Das Spannungs-Zeitoszillogramm eines Zischbogens, das in Fig. 1 abgebildet ist, zeigt Spannungsschwankungen in nicht ganz regelmäßiger Folge. Die Spannung steigt allmählich an, bis es zu einem plötzlichen Spannungszusammenbruch, der am einfachsten als eine Neuzündung des Bogens gedeutet werden kann. Danach wiederholt sich das Spiel, so daß eine ausgeprägte Sägezahnkurve entsteht.

Das äußere Erscheinungsbild ist gegen den ruhig brennenden Bogen wesentlich verändert. Die Entladung setzt nicht mehr an einer kleinen Stelle der Anodenstirnfläche an, sondern scheint sie gleichmäßig aber unruhig zu umhüllen. Die wirklichen Vorgänge an der Anode kann man auf der Filmaufnahme der Fig. 4 erkennen. Von einem Zischbogen, der mit 80 Amp. an 12 cm Kohlen brennt, sind hier etwa 1500 Bilder pro Sekunde

¹⁾ W. Weizel u. J. Fassbender, ZS. f. techn. Phys. 21, 391, 1940.



Fig. 3.

Filmstreifen und schematische Zeichnung eines ruhig brennenden Bogens. Bogenansatz liegt ruhig auf der Anode, Brennfleck wandert darin.



Fig. 3a.

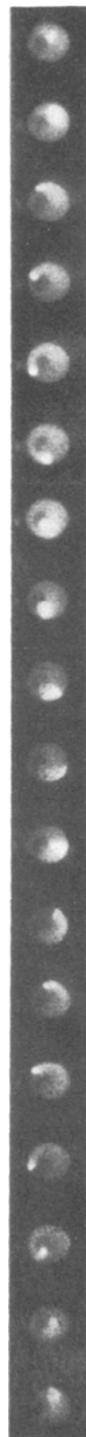


Fig. 4. Filmaufnahme des Zischbogens. Bogenansatz wandert auf der Anode, Brennfleck wandert im Bogenansatz.

zu sehen. Auch hier ist in jedem Augenblick ein hochoverhitztes und heller leuchtendes Gebiet von 10 bis 15 mm² vorhanden, nur bewegt es sich im Gegensatz zum ruhig brennenden Bogen mit großer Geschwindigkeit auf der Anodenoberfläche herum. Bezieht man die Stromdichte auf dieses Gebiet, so erhält man einen Mittelwert von 500 bis 800 Amp./cm². Irgendeine Regelmäßigkeit kann man in dem Herumirren des Bogenansatzes auf der Anode nicht erkennen. Es scheint sich auch nicht um ein Umlaufen in einem bestimmten Drehsinn zu handeln, das von einem Magnetfeld verursacht sein könnte.

Die Fig. 5 zeigt eine Teilvergrößerung eines einzelnen Bildchens der Fig. 4, auf der man deutlich eine bemerkenswerte Feinstruktur des Bogenansatzes erkennen kann. Wie beim ruhig brennenden Bogen bildet sich innerhalb der Ansatzstelle an der Elektrode offenbar ein Brennfleck aus.

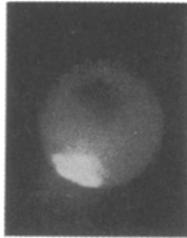


Fig. 5. Bogenansatz mit Feinstruktur, vier Brennflecke enthaltend.

Auf der Abbildung sind mehrere solche Brennflecke zu sehen. Es ist aber möglich, daß dies dadurch vorgetäuscht wird, daß sich während der Belichtungsdauer nacheinander an verschiedenen Stellen innerhalb der Ansatzfläche ein Brennfleck bildet. Da die Einzelbrennflecke ziemlich scharf sind, müßten sie sich sprunghaft und nicht stetig bewegen, da sie sonst eine thermische Spur hinterlassen müßten, wie man sie von dem ganzen Bogenansatz in Fig. 4 schön sieht. Auf der anderen Seite ist es aber auch möglich, daß die Aufteilung des Brennfleckes reell ist. Ähnliches ist auch bei Quecksilberbögen schon bemerkt worden.

Die Größe der Einzelbrennflecke liegt wieder unter 1 mm². Rechnet man die Stromdichte auf einen einzigen Brennfleck um, so kommt man auf über 8000 Amp./cm².

Versuch der Erklärung der beobachteten Erscheinungen. Von den Filmstreifen können folgende Tatsachen abgelesen werden. An der Anode eines Homogenkohlebogens bildet sich ein Brennfleck (vielleicht auch gleich-

zeitig einige solche), der nicht größer als 1 mm^2 ist. In ihm herrschen Stromdichten von mehreren Tausend Amp./cm^2 . Auch beim Kohlebogen kontrahiert sich also die Entladung, wie dies die Theorie erwartet. Sowohl beim ruhigen wie auch beim Zischbogen wandert der Brennfleck umher. Beim ruhigen Bogen bestreicht er dabei jedoch nur ein verhältnismäßig kleines Gebiet von etwa 15 mm^2 , an dem der Bogenansatz festzuliegen scheint. Beim zischenden Bogen irrt der Brennfleck auch in einem solchen Gebiet herum, dieses aber bewegt sich selbst mit ziemlich großer Geschwindigkeit auf der ganzen Anodenstirnfläche ohne erkennbare Regelmäßigkeit herum. Der Bogenansatz wandert also beim Zischbogen auf der Anode.

Die Erklärung, die im folgenden für diesen Sachverhalt versucht wird, soll nicht als eine beweisbare Behauptung angesehen werden, sondern nur als eine Meinung, die man sich über die mutmaßlichen Vorgänge bilden kann und die ziemlich viel für sich zu haben scheint. Um ganz sicher zu gehen, müßten noch viele Untersuchungen unter anderen Bedingungen ausgeführt werden, da es leicht möglich ist, daß bei anderen Betriebsbedingungen andere Ergebnisse gefunden werden. Da dies aber während des Krieges infolge vordringlicherer Arbeiten und infolge Einziehung zum Heeresdienst unmöglich ist, müssen die Ergebnisse in dem vorliegenden unvollkommenen Zustand bekannt gegeben werden, damit eine Fortsetzung der Arbeiten von anderer Seite möglich wird.

Über das Zischen sind in den letzten 20 Jahren viele Arbeiten erschienen. Ayrton¹⁾ gibt Charakteristiken des zischenden Bogens und stellt fest, daß der Umschlag vom ruhigen in den Zischbogen die Brennspannung um etwa 10 Volt senkt. An Hand der Ayrtonschen Messungen versucht Bräuer²⁾ eine Theorie des Zischens zu entwickeln. In einem Strom-Spannungsdiagramm soll der Bogen eine Kurve durchlaufen, die die statische Charakteristik wie eine Hysteresisschleife umschlingt. Hierbei schwankt die Länge und Intensität der Anodenflamme, was das Zischen hervorrufen soll.

Gegen die Bräuersche Auffassung spricht das Spannungszeit-Oszillogramm, das eine ausgesprochene Sägezahnkurve liefert. Offenbar steigt die Spannung zuerst allmählich an, bis bei einer Neuzündung ein Zusammenbruch eintritt. Auch ist es fast selbstverständlich, das Geräusch des Zischens in Zusammenhang mit dem Umherwandern des Bogenansatzes auf der Anode zu bringen.

¹⁾ Frau Ayrton, Inst. El. Eng. 28, 400, 1898. — ²⁾ E. Bräuer, Phys. ZS. 20, 409, 1919.

Den Schlüssel zu allen Erscheinungen sehen wir in Feststellungen Finkelnburgs, daß bei hochbelasteten Bögen das Material der Anode sehr stark verdampft, wodurch sich eine starke Anodenflamme ergibt. In den elektrodennahen Teilen der Flamme muß das Gas von etwa 4000° auf die Säulentemperatur von rund 6000° erhitzt werden und die dazu nötige Energie muß durch den sich gleichzeitig entwickelnden anormalen Anodenfall aufgebracht werden.

Von den Vorgängen an der Anode des Kohlelichtbogens gewinnt man jetzt leicht folgendes Bild, das schon vor einiger Zeit¹⁾ von uns skizziert wurde, jetzt aber mit mehr Einzelheiten ausgestaltet werden kann. An der Anode setzt der Bogen mit einer Säule oder Flamme an, die einen Querschnitt von 15 bis 20 mm² besitzt. Dies konnte auch auf zahlreichen Photographien festgestellt werden. Unmittelbar vor der Elektrode kontrahiert sich die Säule auf einen Brennfleck von unter 1 mm² Fläche, vielleicht auf einige solcher Flecke. Im Brennfleck wird wohl in jedem Fall die Kohle auf ihren Siedepunkt erhitzt. Das Leuchten des Fleckes rührt aber vermutlich nicht von der festen Kohle her, sondern entsteht in der Gasschicht unmittelbar davor. Dafür spricht die ziemlich scharfe Kontur der Flecke, die man bei einer lokalen Erhitzung der Kohle kaum erwarten kann. Durch die Verdampfung der Kohle entsteht ein feiner Gasstrahl, der den Brennfleck vertreibt und ihn zum Umherwandern zwingt. Dies führt aber noch nicht zum Zischen. Das Gebiet, in welchem sich der Brennfleck bewegen kann, ist durch den Querschnitt der Säule (Flamme) bestimmt und seine Bewegung ändert weder die Brennspannung nennenswert, noch gibt sie Anlaß zu einer zeitlichen Änderung der Temperatur und Dichteverteilung im Gas vor der Anode. Die Bewegung des Brennfleckes ist also nur optisch, nicht aber elektrisch oder akustisch wahrnehmbar, solange der Ansatz der Säule als Ganzes noch an derselben Stelle der Anode bleiben kann.

Bei größerem Strom tritt eine Änderung dieses Sachverhalts ein, wenn durch den oder die Brennflecke ein größeres Gebiet der festen Kohle, das ungefähr dem Säulenquerschnitt entspricht, auf die Siedetemperatur erhitzt wird. Dann bildet sich ein Gasstrahl von diesem Querschnitt aus, die Spannung steigt an, und schließlich wird die Entladung außerhalb des Dampfstrahls neu zünden. Damit verlagert sich auch die Säule an eine andere Stelle und vor der Elektrode bildet sich eine andere örtliche Temperatur und Dichteverteilung aus. Die Dichteschwankung des Gases wird als Zischen hörbar.

¹⁾ W. Weizel u. J. Fassbender, ZS. f. techn. Phys. 21, 391, 1940.

Für das Umherwandern der Brennflecke und des ganzen Bogenansatzes könnte man auch noch folgende Erklärung versuchen: Auch die sogenannten Homogenkohlen bestehen nicht aus reinem Kohlenstoff, sondern werden mit einem Bindemittel hergestellt. Wie Schmitz feststellte¹⁾, verursachen fast alle Beimengungen zur Kohle eine Herabsetzung des Anodenfalles. Setzt der Bogen an einer Stelle der Anode an, so wird dort zunächst das Bindemittel verdampfen und reinere Kohle übrig bleiben. Diese erfordert jetzt einen höheren Anodenfall als die Nachbarstellen, wo das Bindemittel noch vorhanden ist. Der Bogen wird also dahin abwandern. Um diese Erklärungsmöglichkeit auszuschalten, hat Schlüter die hier geschilderten Versuche mit Ruhstrat-Spektralkohlen, die keine Verunreinigungen mehr enthalten, wiederholt und genau dieselben Ergebnisse gefunden.

¹⁾ G. Schmitz, Diss. Bonn 1941.