Die Vorgänge an der Kathode des Quecksilbervakuumlichtbogens.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Von **A. Günther-Schulze** in Charlottenburg.

(Eingegangen am 21. August 1922.)

1. **Apparatur:** Zu den im folgenden beschriebenen Versuchen wurden die Quecksilberdampflichtbogen in Quecksilberdampfgleichrichtergefäßen aus Glas erzeugt. Diese sind hochgradig evakuiert, besitzen eine genügend große Kühlfläche, um den Quecksilberdampfdruck auch bei stärkeren Strömen niedrig zu halten und gestatten, wenn sie neu und noch frei von Beschlag sind, eine sehr bequeme Beobachtung des Kathodenfleckes auf dem Quecksilber. Es standen drei Gleichrichtertypen zur Verfügung: Ein vor dem Kriege von der Westinghouse-Company gelieferter Einphasengleichrichter für 5 Amp., ein Drehstromgleichrichter der Reichsanstalt für 10 Amp., endlich ein von der AEG zur Verfügung gestellter Drehstromgleichrichter für 100 Amp. in zwei Exemplaren.

2. **Versuche:** Der Kathodenfall des Quecksilbervakuumlichtbogens ist nach Stark¹⁾ von der Stromstärke unabhängig und beträgt

$$5,27 \pm 0,09 \text{ Volt.}$$

Es werden also an der Kathode für 1 Amp. in der Sekunde $5,27 \pm 0,09$ Wattsec frei. Diese beschleunigen entweder positiv geladene Quecksilberionen auf die Kathode zu, oder negative Elektronen von der Kathode weg. Die von den beschleunigten Hg-Ionen aufgenommene Energie wird beim Aufprall der Ionen auf die Kathode an diese abgegeben, wenn die Zusammenstöße im Gebiete des Kathodenfalles so selten sind, daß die durch sie zerstreute Energie zu vernachlässigen ist. Die von den Elektronen aufgenommene Energie wird irgendwo in der Gasstrecke frei. Die Messung der an der Kathode freiwerdenden Energie ergibt demnach, welcher Bruchteil des gesamten Stromes durch positive Ionen und welcher durch Elektronen befördert wird.

An der Kathode finden folgende Arten von Energieverbrauch statt:

1. Wärmeableitung aus dem Kathodenfleck in das Quecksilber der Kathode,
2. Strahlung des Kathodenfleckes,

¹⁾ Stark, Retschinsky u. Schaposchnikoff, Ann. d. Phys. 18, 213, 1905.

3. Verdampfungswärme des verdampfenden Quecksilbers.

Diese Größen sowie die zu ihrer Ermittlung nötige Größe des Kathodenfleckes sind folgendermaßen gemessen worden.

A. Wärmeableitung aus dem Kathodenfleck in das Quecksilber der Kathode.

Diese Wärmemenge wurde kalorimetrisch bestimmt. Der Kathodenansatz des zu untersuchenden Gleichrichters wurde derart in ein mit Wasser gefülltes Glasgefäß getaucht, daß der Wasserspiegel eben unterhalb des Quecksilberspiegels lag. Es wurde dafür gesorgt, daß die Temperatur des Wassers vor dem Versuch ebenso viel unter der Zimmertemperatur wie nach dem Versuch oberhalb derselben lag. Die Strahlung aus dem Gleichrichter und seinen Seitenarmen wurde vom Wasser durch mehrere Lagen Asbest und Papier ferngehalten. Das Wasser wurde während der Versuche dauernd gerührt und seine Temperatur mit einem Thermometer, das hundertstel Grade schätzen ließ, laufend abgelesen. Die Wärmekapazität des Quecksilbers und Glases wurde auf den Wasserwert umgerechnet und berücksichtigt. Die Messungen hatten folgende Ergebnisse:

Tabelle 1.

Strom	Wärme pro Sek. und Amp.	Wärme in Proz. der Kathodenfallenergie
2,50 Amp.	2,56 Wattsec	48,8
5,10 "	2,80 "	53,3
10,18 "	2,56 "	48,8
15,08 "	2,78 "	53,0
Mittel:	2,68 "	51,0

Folgende Fehlerquellen kommen in Frage:

1. Durch die Wasserkühlung wird das Quecksilber der Kathode auf einer einen bis einige Grade über der Wassertemperatur liegenden Temperatur, also im wesentlichen auf Zimmertemperatur, gehalten. Sobald also der Gleichrichter heiß geworden ist, bildet das Kathodenquecksilber infolge der Kühlung den kältesten Teil des Gleichrichters, so daß zu befürchten ist, daß das verdampfte Quecksilber sich vorzugsweise auf der Kathode kondensiert und dieser Kondensationswärme zuführt. Die Störung kommt bei Beginn des Versuches, solange der gesamte Gleichrichter kalt ist, nicht in Frage; sie nimmt um so mehr zu, je heißer er wird. In dieser Richtung angestellte Versuche ergaben jedoch, daß ein derartiger Einfluß der Dauer der

Einschaltung auf die gemessene Wärmemenge nicht zu ermitteln war. Ebenso ergibt eine Überschlagsrechnung, daß die in Frage kommende Kondensationswärme gegenüber der gemessenen Wärme vernachlässigt werden kann.

2. Wärmeaufnahme durch Strahlung vom Bogen her. Der Spannungsverlust im Quecksilbervakuumlichtbogen beträgt — von der Stromstärke nur wenig abhängig, solange der Druck gering bleibt — etwa 0,3 Volt pro Zentimeter. Über der Kathode befindet sich zunächst der nicht strahlende Kathodendunkelraum. Derjenige Teil der leuchtenden positiven Säule, der trotz der Abschirmung die Kathode bestrahlen konnte, hatte eine Länge von etwa 2 cm. Unter der Voraussetzung, daß die Strahlen sich gleichmäßig nach allen Seiten ausbreiten, entfällt dann auf die Kathode für 1 Amp. ein Betrag von 0,1 Wattsec. Infolgedessen fällt die kalorimetrisch gemessene Energie um etwa 4 Proz. zu groß aus.

3. Wärmeabgabe aus dem Kalorimeterwasser durch Verdampfung. Auch diese ist so gering, daß sie keinen wesentlichen Einfluß auf die Messungen hat. Da nun die Fehlerquelle 2. die gemessene Energie zu hoch, 3. dagegen sie zu niedrig erscheinen läßt, so daß die an sich schon geringen Fehler sich zum Teil kompensieren, sind sie vernachlässigt worden.

Es ergibt sich also: Die vom Kathodenfleck durch Wärmeableitung an das Kathodenquecksilber abgegebene Wärmemenge ist der Stromstärke proportional und beträgt 2,68 Wattsec pro Ampere und Sekunde, oder 51,0 Proz. der gesamten Kathodenfallenergie.

B. Ermittlung der Größe des Kathodenfleckes.

Über die Größe des Lichtbogenkathodenfleckes liegen nur bei Kohlekathoden Messungen vor, und zwar von Reich¹⁾, Granqvist²⁾ und Günther-Schulze³⁾. Reich findet bei 9 cm Bogenlänge für den Radius r des Kathodenfleckes $r = 0,01 + 0,009 i$, Granqvist gibt an: $r = 0,043 + 0,008 i$, Günther-Schulze stellt fest, daß zwischen der Größe des Kathodenfleckes und der Stromstärke Proportionalität besteht, wenn die Anoden so weit entfernt sind, daß ihre Strahlung die Erscheinungen an der Kathode nicht mehr merklich

¹⁾ M. Reich, Phys. ZS. 7, 73, 1906.

²⁾ G. Granqvist, Nova Acta Upsala 20, 143, 1903.

³⁾ Günther-Schulze, vorstehende Arbeit.

beeinflußt; und zwar ist $r = 0,0261$. $\dot{z}$. Hieraus ergibt sich für eine Stromstärke von 10 Amp.:

Nach Reich:	$O = 0,0314$ qcm, Stromdichte 318 Amp. pro qcm
" Granqvist:	$O = 0,0476$ " " 210 " " "
" Günther-Schulze:	$O = 0,0213$ " " 470 " " "

Über die Größe des Kathodenfleckes von Metalllichtbogen habe ich zuverlässige Angaben nicht finden können. Granqvist sagt nur, daß er wesentlich kleiner sein muß als bei Kohle, weil die Wärmeleitfähigkeit der Metalle so sehr viel größer ist als die der Kohle, während der Kathodenfall nicht sehr verschieden ist, so daß sich der Kathodenfleck des Metalllichtbogens, um die für den Austritt der Elektronen erforderliche hohe Temperatur zu erzielen, auf eine kleinere Oberfläche zusammenziehen muß, als der des Kohlelichtbogens.

Über den Kathodenfleck des Quecksilbervakuumlichtbogens finden sich bei Stark zwei offenbar nur auf Schätzung beruhende, voneinander abweichende Angaben; nämlich 0,02 qcm bei 3 Amp.¹⁾ und an anderer Stelle 0,1 qcm bei 3 Amp.²⁾.

Nun ist die Schätzung der Größe des Kathodenfleckes in diesem Falle wegen der außerordentlich schnellen, unregelmäßigen Irrbewegung des Fleckes auf dem Quecksilber sowie wegen der bei seiner hohen Temperatur sehr starken Irradiationswirkung sehr mißlich, und es zeigen die folgenden Versuche in der Tat, daß Starks Schätzungen der Größenordnung nach falsch sind.

Anfangs wurde versucht, den Kathodenfleck in natürlicher Größe durch eine sehr kurze Momentaufnahme photographisch zu fixieren, um ihn dann auszumessen. Es zeigte sich jedoch, daß erstens der Fleck so schnell hin und her irrt, daß er schon bei einer Belichtungsdauer von weniger als 0,01 sec eine umfangreiche, völlig unregelmäßige Bahn auf die Platte zeichnete, und daß sich zweitens diese Bahn nicht mit genügender Schärfe herausentwickeln ließ, weil die oberhalb des Kathodenfleckes befindliche, unvermeidliche Strahlung des Lichtbogens, die photographisch sehr wirksam ist, die Platte beträchtlich schwärzte. Deshalb wurde in den Strahlengang ein rotierender Spiegel eingeschaltet, der sich mit mäßiger Geschwindigkeit drehte und den Fleck zu einem hellen Bande auseinanderzog. Gleichzeitig wurde durch Momentaufnahme von weniger als 0,01 sec dafür gesorgt, daß die Platte durch den rotierenden Spiegel nur einmal beleuchtet wurde. Durch diese Vorkehrungen wurde das störende Licht des Lichtbogens sehr viel schwächer, so daß sich das vom Kathoden-

¹⁾ J. Stark u. M. Reich, Phys. ZS. 4, 321, 1903.

²⁾ J. Stark, Phys. ZS. 5, 750, 1904.

fleck erzeugte Band gut ausmessen ließ. Aus seiner gemessenen mittleren Breite und dem Vergrößerungsfaktor der Anordnung wurde der Querschnitt des Fleckes ermittelt. Die Messungen können nicht den Anspruch erheben, Präzisionsmessungen zu sein, Fehler von mehreren Prozenten sind nicht zu vermeiden. Für den vorliegenden Zweck aber genügt diese Genauigkeit, die zu steigern außerdem kaum möglich sein dürfte, weil die Voraussetzung einer genauen Querschnittsermittlung, die Kenntnis der Oberflächenform des Fleckes, fehlt. Der Fleck drückt in die Quecksilberoberfläche eine Vertiefung und wölbt sie dadurch. Wie groß die Vertiefung, wie groß ihre Wölbung ist, und ob dabei die Seitenwände der Vertiefung auch vom Fleck bedeckt sind oder nicht, dürfte sich bei der außerordentlichen Geschwindigkeit, mit der der Fleck sich hin und her bewegt, kaum feststellen lassen.

Bei den Versuchen zeigte sich, daß sich bei Strömen von etwa 10 Amp. an aufwärts der Fleck häufig in zwei oder mehrere kleinere Flecke auflöst, die jedoch stets einander nahe bleiben, und von denen der kleinere meistens schnell auf Kosten des größeren wieder erlischt, so daß sich ein immerwährendes Teilen und Wiedervereinigen des Kathodenfleckes abspielt.

Bei Strömen von 40 Amp. finden sich gelegentlich vier und mehr Einzelflecke. In diesen Fällen wurde die Größe der einzelnen Flecke für sich bestimmt und addiert. Als Mittel aus mehreren Versuchsreihen ergaben sich folgende Werte:

Tabelle 2.

Strom	Oberfläche des Fleckes	Oberfläche Strom	Stromdichte
Amp.	qcm	qcm/Amp.	Amp./qcm
5,0	0,001 22	$2,44 \cdot 10^{-4}$	4100
10,9	0,002 65	$2,43 \cdot 10^{-4}$	4120
41,0	0,014 0	$2,72 \cdot 10^{-4}$	3670
	Mittel:	$2,53 \cdot 10^{-4}$	4000

Hiernach ist die Größe des Kathodenfleckes nur etwa $\frac{1}{100}$ von der, die Stark geschätzt hat, und etwa $\frac{1}{12}$ von der Größe des Kathodenfleckes des Kohlelichtbogens.

Ein Versuch, den Kathodenfleck des Eisenlichtbogens in Luft durch stark vergrößerte Abbildung auf einem weißen Schirm und Ausmessung zu finden, lieferte wegen der großen Unruhe des Kathodenfleckes nur rohe Werte und ergab eine Fleckgröße von

$1,4 \cdot 10^{-4}$ qcm pro Ampere, also eine Stromdichte von 7200 Amp. pro Quadratzentimeter. Damit ergibt sich folgende Zusammenstellung:

Tabelle 3.

Art des Lichtbogens	Stromdichte im Kathodenfleck Amp./qcm	Wärmeleitvermögen der Kathoden bei 18° C
Kohle in Luft	470	0,000 43
Quecksilber-Vakuum . .	4000	0,018
Eisen in Luft	7200	0,16

Wird angenommen, daß eine bestimmte, in erster Annäherung für viele Materialien gleiche Temperatur des Kathodenfleckes für die Existenz des Lichtbogens erforderlich ist, so muß die Stromdichte so lange zunehmen, bis diese Temperatur trotz der Verluste an der Kathode erreicht ist. Da diese Verluste nun zum größten Teile aus Wärmeableitung an die Kathode bestehen, und der Kathodenfall für die drei angegebenen Substanzen nicht sehr verschieden ist, muß die Stromdichte um so größer sein, je größer die Wärmeleitfähigkeit der Kathode ist, was die vorstehende Zusammenstellung auf das beste bestätigt.

C. Die Strahlung des Kathodenfleckes.

Die Temperatur des Kathodenfleckes ist bisher nur beim Kohlelichtbogen gemessen und ergab sich unter normalen Verhältnissen zu 3600° abs. Die des Kathodenfleckes des Quecksilbervakuumlichtbogens ist in der Literatur mehrfach zu 2000° C geschätzt worden. Wird dieser Wert einfachheitshalber als schwarze Temperatur des Kathodenfleckes angesehen, so ergibt sich pro Ampere Stromstärke eine Strahlung des Kathodenfleckes von 0,0366 Watt. Wird die schwarze Temperatur zu 3000° abs. angesetzt, so ist die Strahlung 0,111 Watt.

Infolge der außerordentlich geringen Größe des Fleckes spielt also seine Strahlung gegenüber den anderen Wärmeverlusten nur die Rolle einer Korrektur. Infolgedessen ist die genaue Kenntnis der Temperatur und des Emissionsvermögens des Kathodenfleckes für die vorliegende Arbeit nicht erforderlich.

D. Die Verdampfungsgeschwindigkeit des Quecksilbers im Kathodenfleck.

Zur Ermittlung der Verdampfungsgeschwindigkeit des Quecksilbers im Kathodenfleck diente einer der großen Glasgleichrichter der AEG für 100 Amp. Dieser wurde zu dem Versuche so weit gekippt, daß sich das in Verbindung mit der Stromzuführung stehende

Quecksilber nur noch in dem engen unteren, annähernd zylindrischen Ansatz befand.

Die Dicke der Glaswand dieses Ansatzes wurde optisch ermittelt, so daß die in ihm vorhandene Quecksilbermenge als Funktion ihrer Standhöhe genau bekannt war, und sich die in einer gegebenen Zeit verdampfende Quecksilbermenge durch direkte Messung der Standhöhe des Quecksilbers finden ließ. Die Schrägstellung des Gleichrichters verhinderte gleichzeitig, daß das an seinen Wänden kondensierte und zurückrinnende Quecksilber in den Ansatz gelangte. Um in dieser Beziehung jedoch ganz sicher zu gehen, wurde vor jedem Versuch das kondensierte Quecksilber von den Wänden entfernt. Dann floß während der Dauer eines Versuches überhaupt kein Quecksilber von den Wänden herab, da die Aufnahmefähigkeit der Glaswände des Gleichrichters für die kondensierten Quecksilberkugeln recht beträchtlich ist. Auf diese Weise ergaben sich folgende Werte:

Tabelle 4.

Strom Amp.	In einer Minute verdampfte Hg-Menge ccm	Verdampfte Hg-Menge
		Strom ccm/Amp.
1,53	$4,88 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^{-2}$
3,00	$9,06 \cdot 10^{-2}$	$3,02 \cdot 10^{-2}$
5,20	$16,8 \cdot 10^{-2}$	$3,23 \cdot 10^{-2}$
7,30	$22,8 \cdot 10^{-2}$	$3,13 \cdot 10^{-2}$
10,65	$36,4 \cdot 10^{-2}$	$3,42 \cdot 10^{-2}$
	Mittel:	$3,20 \cdot 10^{-2}$

Es zeigt sich also: Die in der Zeiteinheit verdampfende Menge Quecksilber ist der Stromstärke proportional. Sie beträgt für 1 Amp. und 1 Sek. $5,33 \cdot 10^{-4}$ ccm oder $7,20 \cdot 10^{-3}$ g. Die durch die Tabelle angezeigte genaue Proportionalität zwischen der verdampften Menge und der Stromstärke befindet sich im Einklang damit, daß die Oberfläche des Kathodenfleckes der Stromstärke proportional ist und beweist außerdem, daß die Verdampfung der nicht vom Lichtbogenfleck bedeckten Teile der Kathode gegenüber der Verdampfung aus dem Fleck nicht in Frage kommt. Die insgesamt verdampfende Quecksilbermenge ist noch wesentlich größer als die gemessene, denn zu ihr kommt noch diejenige Menge Quecksilber hinzu, die durch den Strom als Hg^+ -Ionen aus dem Lichtbogen in das Quecksilber geschossen wird. Unter der Annahme, daß praktisch der gesamte Strom an der Kathode durch Quecksilberionen und nur ein verschwindender Rest des Stromes durch Elektronen transportiert wird (eine Annahme,

die im folgenden ihre Bestätigung finden wird), ist die Menge der an der Kathode abgeschiedenen Hg-Ionen nach dem Faradayschen Gesetz für 1 Ampsec $2,077 \cdot 10^{-3}$ g. Also verdampfen insgesamt in 1 Ampsec $7,20 + 2,077 \cdot 10^{-3} = 9,277 \cdot 10^{-3}$ g Quecksilber.

Der Berechnung der Verdampfungswärme der verdampfenden Quecksilbermenge von $7,20 \cdot 10^{-3}$ g¹⁾ lassen sich zwei Annahmen zugrunde legen. Die erste ist, daß Quecksilber bei der Verdampfung nur diejenige Energie aufnehmen kann, die seiner Siedetemperatur — im vorliegenden Falle etwa 100°C — entspricht. Die zweite Annahme dagegen besteht darin, daß die Quecksilberatome die Kathodenoberfläche mit derjenigen Energie verlassen, die der Temperatur des Kathodenfleckes von über 2000° entspricht.

Bei der Annahme 2 ist zu der Verdampfungswärme für 100°C noch diejenige Wärmemenge hinzuzuzählen, die nötig ist, um den Quecksilberdampf von 100°C auf über 2000° zu erhitzen. Für die Verdampfungswärme des Quecksilbers folgt aus der von Nernst²⁾ angegebenen Formel $\lambda = 15\,277 - 1,68\,T$ für 100°C

$$\lambda = 14,66 \text{ kcal/Mol.}$$

Um also, gemäß Annahme 1, $7,20 \cdot 10^{-3}$ g Quecksilber bei 100°C zu verdampfen, sind erforderlich:

$$\frac{7,20 \cdot 10^{-3}}{200,6} \cdot 14,66 \cdot 4,183 \cdot 10^3 = 2,20 \text{ Wattsec,}$$

um weiterhin gemäß Annahme 2 die verdampfende Quecksilbermenge auf die Temperatur von 2000° zu bringen, sind erforderlich $1,107$ Wattsec, so daß insgesamt in diesem Falle $3,31$ Wattsec erforderlich wären. Zusammen mit dem Wärmeverlust von $2,68$ Wattsec durch Wärmeableitung des Kathodenquecksilbers ergibt das $5,99$ Wattsec, während nur $5,27$ Wattsec zur Verfügung stehen. Folglich ist Annahme 2 falsch.

Dagegen ergibt die Rechnung mit Annahme 1 folgendes:

a) Wärmeableitung in das Kathodenquecksilber	2,68 Wattsec
b) Strahlung bei 2000°C	0,04 „
c) Verdampfungswärme des Quecksilbers	2,20 „

Sa. 4,92 Wattsec.

Wird die Temperatur des Kathodenfleckes zu 3000°C angenommen, so wird die Summe $4,99$ Wattsec. Die erste Zahl ist

¹⁾ Denn die verdampfenden $2,077 \cdot 10^{-3}$ g sind zuvor kondensiert, fallen also bei der Berechnung heraus.

²⁾ W. Nernst, ZS. f. Elektrochem. **22**, 185, 1916.

6,6 Proz., die zweite 3,8 Proz. kleiner als der nach Stark zur Verfügung stehende Mittelwert von 5,27 Wattsec. Es folgt also aus den Versuchen:

Fast die gesamte durch den Kathodenfall erzeugte Energie findet sich im Kathodenfleck wieder.

Das heißt: Praktisch die gesamte Energie befindet sich auf den auf die Kathode zufliegenden Hg-Ionen oder nahezu der gesamte Strom wird an der Kathode durch positive Ionen transportiert, und die von der Kathode wegfliegenden negativen Elektronen machen nur einen verschwindenden Bruchteil des gesamten Stromes aus¹⁾. Damit hat diese bei der Berechnung der Verdampfungswärme vorweggenommene Annahme ihre Bestätigung erhalten.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt Bräuer²⁾ beim Kohlelichtbogen in Luft, bei dem nach seinen Ausführungen ebenfalls der Elektronenstrom an der Kathode nur wenige Prozente des Gesamtstromes ausmacht. So sehr ich diesem Ergebnis zustimme, so wenig vermag ich die Versuche Bräuers als beweisend anzusehen. Die Ergebnisse werden aus Messungen der Stromstärke des Lichtbogens abgeleitet, die mit Hilfe eines gewöhnlichen Schleifenoszillographen unmittelbar nach dem Ausschalten des Lichtbogenstromes ausgeführt worden sind. Der Oszillograph vollführt beim Ausschalten stark gedämpfte Eigenschwingungen, trotzdem glaubt Bräuer, die wahre Kurve der Stromabnahme konstruieren zu können. Meines Erachtens können hier nur Aufnahmen mit einem trägheitslosen Oszillographen, also mit einem Braunschen Rohre oder einem Glimmlichtoszillographen etwas beweisen, da sich die entscheidenden Vorgänge in einer ganz außerordentlich kurzen Zeit abspielen.

E. Der auf den Kathodenfleck ausgeübte Druck.

Vor der weiteren Diskussion der elektrischen Verhältnisse des Kathodenfleckes sei kurz auf die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse in und unmittelbar über dem Kathodenfleck eingegangen.

Sowohl die auf die Kathode zuströmenden Quecksilberionen als auch die verdampfenden Quecksilberatome üben auf die Oberfläche des Kathodenfleckes einen Druck aus, der sich folgendermaßen berechnet:

¹⁾ Daher die hohe Raumladung an der Kathode, die natürlich in einer Entfernung von weniger als 1 mm von der Kathode bereits Null geworden ist.

²⁾ E. Bräuer, Ann. d. Phys. (4) 60, 95, 1919.

1. Die auf die Kathode zuströmenden Quecksilberionen. Bei einfacher Ladung treffen $2,077 \cdot 10^{-3}$ g Hg auf eine Fläche von $2,53 \cdot 10^{-4}$ qcm; auf 1 qcm also in 1 Sek. 8,21 g Hg. Nach der Formel:

$$\frac{1}{2} m u^2 = V \cdot Q = \text{Kathodenfall} \cdot \text{Ladung}$$

berechnet sich die Geschwindigkeit u eines Quecksilberions zu

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot 5,27 \cdot 10^8 \cdot 1,56 \cdot 10^{-20}}{1,64 \cdot 10^{-24} \cdot 200,6}} = 2,23 \cdot 10^5 \text{ cm/sec.}$$

Also ist der Stoßdruck $p = M \cdot u$

$$p = 8,21 \cdot 2,23 \cdot 10^5 = 1,83 \cdot 10^6 \text{ Dyn} = 1,8 \text{ Atm.}$$

2. Die verdampfenden Hg-Atome. Diese betragen pro Ampsec $9,277 \cdot 10^{-3}$ g auf einer Fläche von $2,53 \cdot 10^{-4}$ qcm, also pro qcm 36,7 g. Es ist aber

$$u = \frac{261 \cdot 100}{\sqrt{200,6}} \sqrt{\frac{373}{273}} = 2,15 \cdot 10^4 \text{ cm/sec.}$$

Also der Druck $p = M \cdot u = 0,78 \text{ Atm.}$

Es ergibt sich also insgesamt ein Druck von 2,58 Atm. Daß dieser im Vergleich zu dem im Gleichrichtergefäß vorhandenen Quecksilberdampfdruck von weniger als 0,001 Atm. außerordentlich hohe Druck nur eine Vertiefung von einem bis einigen Millimetern in das Quecksilber drückt, liegt an der außerordentlichen Geschwindigkeit, mit der der Kathodenfleck hin und her irrt. Sie läßt sich der Größenordnung nach aus den photographischen Aufnahmen zu 10^3 cm pro sec schätzen. Diese Geschwindigkeit zusammen mit der geringen Größe des Fleckes bewirkt, daß er im Mittel etwa 10^{-5} sec gebraucht, um über einen gegebenen Punkt der Kathodenoberfläche hinwegzustreichen.

In einer so kurzen Zeit kann selbst ein Druck von 2 Atm. bei der großen trägen Masse des Quecksilbers nur eine geringe Vertiefung in ihm erzeugen.

Auch die Dichte des Quecksilberdampfes unmittelbar über dem Kathodenfleck ist abnorm groß. 8,21 g pro qcm Hg-Ionen strömen mit der Geschwindigkeit $2,23 \cdot 10^5$ cm pro sec auf die Kathode zu. Daraus berechnet sich ihre Dichte zu $5,62 \cdot 10^{-3}$ Atm., entsprechend einem Druck von 4,28 mm Quecksilbersäule. Sie ist also etwa 10 mal so groß wie die mittlere Dichte des Quecksilberdampfes im Gleichrichter. Aus der berechneten Geschwindigkeit der verdampfenden Quecksilberatome, nämlich $2,14 \cdot 10^4$ cm pro sec und der verdampfenden Menge von 36,7 g pro qcm ergibt sich eine Dichte des Quecksilberdampfstrahles von 0,261 Atm., entsprechend einem

Druck von 198 mm Quecksilbersäule. Die Dichte des Quecksilberdampfstrahles ist also unmittelbar über dem Kathodenfleck etwa 500 mal so groß, wie die mittlere Dampfdichte im Gefäß. Sie äußert sich jedoch zunächst nicht als allseitiger Druck, weil alle verdampfenden Atome im wesentlichen in der gleichen Richtung fliegen.

F. Darstellung der Vorgänge an der Kathode.

Es läßt sich nunmehr von den Vorgängen an der Kathode folgendes Bild entwerfen.

Die durch den Kathodenfall von 5,27 Volt beschleunigten Quecksilberionen stürzen mit einer Endgeschwindigkeit von im Mittel $2,7 \cdot 10^5$ cm in der Sekunde im Kathodenfleck auf die Kathode. Die durch den Stoß der getroffenen Quecksilberatome auf die Quecksilberoberfläche übertragene Energie ist so groß, daß sie diese auf eine Temperatur von mehr als 2000° erhitzt, so daß sie Glühelatronen in geringer Zahl auszusenden vermag. Da aber die Siedetemperatur des Quecksilbers bei den in Frage kommenden Drucken in der Gegend von 100° C liegt, verdampfen die getroffenen Atome nicht nur momentan, sondern geben gleichzeitig an die benachbarten Atome die zum Verdampfen nötige Energie ab, so daß für jedes auftreffende Hg-Ion etwa 6 Hg-Atome verdampfen. Dadurch entsteht ein Dampfstrahl, der mit der Dichte von 0,26 Atm. und der Geschwindigkeit von $2,2 \cdot 10^4$ cm pro sec in die Höhe fährt und dadurch den ihm entgegenkommenden Strahl positiver Ionen beiseite schleudert, so daß dieser gezwungen wird, stets auf neue Stellen der Kathode herabzustoßen, und der Kathodenfleck infolgedessen mit großer Geschwindigkeit hin und her irrt, wobei es bei größeren Strömen naturgemäß häufig zur Teilung des Fleckes in mehrere Teile kommt.

Endlich sind noch die beiden Fragen zu erörtern: 1. Weshalb ist die Emission negativer Elektronen an der Kathode eine Existenzbedingung des Lichtbogens, obwohl der ganz überwiegende Teil des Stromes an der Kathode durch positive Ionen transportiert wird? 2. Weshalb genügen so außerordentlich wenige Elektronen an der Kathode?

Die Antwort auf die erste Frage dürfte folgende sein: Ein Lichtbogen ist eine Entladungsform, in der nur die negativen Elektronen imstande sind, durch Stoß neue Ionen zu bilden, während die positiven Ionen in ihm diese Fähigkeit nicht besitzen. Diese, schon von Stark ¹⁾ angegebene Eigenschaft des Lichtbogens dürfte ihn treffender

¹⁾ Stark, Retschinsky und Schaposchnikoff, l. c.

charakterisieren, als alle anderen Definitionen. Da nun die negativen Elektronen mit großer Geschwindigkeit von der Kathode zur Anode strömen, müssen sie an der Kathode durch einen neuen Mechanismus dauernd nachgeliefert werden. Setzt diese Nachlieferung auch nur den kürzesten Moment aus, so wird damit sofort die Ionisation in der Gasstrecke und damit auch der Strom unterbrochen.

Die zweite Frage führt zu dem Begriff der Ionisierungsspannung. Diese beträgt bei Quecksilberdampf 10,4 Volt, d. h. ein stoßendes Elektron muß die einer frei durchlaufenden Spannung von 10,4 Volt entsprechende Geschwindigkeit erreicht haben, wenn es imstande sein soll, ein Quecksilberatom durch Stoß zu ionisieren.

Stillschweigende Voraussetzung ist dabei, daß das getroffene Quecksilberatom sich vor dem Zusammenstoß in einem vollkommen unangeregten Gleichgewichtszustand befand. Dieses ist nun in der Gasstrecke eines Lichtbogens nicht im entferntesten der Fall. Infolge der hohen Stromdichte in der Gasstrecke ist in ihr die Konzentration der Ionen und damit nicht nur die Ionisierung, sondern auch die Molisierung verhältnismäßig groß. Bei jeder Molisierung aber wird die gleiche Energie wieder frei, die zu einer Ionisierung nötig ist; d. h. pro Hg-Atom die 10,4 Volt $\cdot 1,56 \cdot 10^{-20}$ Coul. entsprechende Energie. Diese von den molisierten Atomen ausgestrahlten Energien werden von den benachbarten Atomen aber zum größten Teile wieder absorbiert und bringen diese dadurch an die Grenze der Ionisierung, so daß ein geringer zusätzlicher Elektronenstoß genügt, um die Ionisierung herbeizuführen. Ein Kennzeichen dieser Energieanhäufung im Lichtbogen ist die hohe, noch nie sicher gemessene Temperatur der Lichtbogengase. Man hat also im Quecksilberlichtbogen mit Ionisierungsspannungen zu rechnen, die Bruchteile eines Volt betragen.

Die Ansicht Bräuers¹⁾, wonach ein Elektron in der positiven Säule des Quecksilberlichtbogens seine Energie bei einem Zusammenstoße nicht verliert, sondern sie aufspeichert, bis sie so groß geworden ist, daß sie zur Stoßionisation hinreicht, wobei Bräuer irrtümlich eine Ionisierungsspannung von 5 Volt annimmt, dürfte nicht haltbar sein, denn hiernach könnte ein Elektron erst ionisieren, wenn es in der positiven Säule insgesamt eine Spannung von 10,4 Volt durchlaufen hätte, während die Spannung der gesamten Gasstrecke bei Gleichrichtern mit kürzeren Armen noch nicht 3 Volt beträgt, so daß eine gleichmäßige Ionisierung der positiven Säule völlig unmöglich wäre.

¹⁾ Graetz, Handb. d. Elektr. u. d. Magn. III, 3, S. 541, 1920.

In der positiven Lichtsäule sind, da durch die Stoßionisation gleich viel positive und negative Ionen gebildet werden, ebenso viel positive wie negative Ionen vorhanden. Da aber die Beweglichkeit der negativen Elektronen sehr viel größer ist als die der positiven Quecksilberionen, wird der Strom in der positiven Lichtsäule, ganz im Gegensatz zum Kathodenfallraum, praktisch nur durch die negativen Elektronen befördert.

Zusammenstellung.

1. Als Kathodenfall des Quecksilbervakuumlichtbogens wurde der von Stark gemessene Wert von $5,27 \pm 0,09$ Volt dem Folgenden zugrunde gelegt.

2. Die vom Kathodenfleck des Quecksilbervakuumlichtbogens durch Wärmeleitung an das Kathodenquecksilber abgegebene Wärmemenge ist der Stromstärke proportional und beträgt pro Ampsec 2,68 Wattsec oder 51 Proz. der gesamten Kathodenfallenergie.

3. Die Größe des Kathodenfleckes ist ebenfalls der Stromstärke proportional und beträgt $2,53 \cdot 10^{-4}$ qcm pro Amp. Die Stromdichte im Kathodenfleck ist rund 4000 Amp. pro qcm. Die Strahlung des Fleckes ist infolge seiner Kleinheit gering und beträgt 0,0366 Watt, wenn seine schwarze Temperatur zu 2273°C abs., und 0,111 Watt, wenn sie zu 3000° abs. angenommen wird.

4. Auch die Gewichtsabnahme des Kathodenquecksilbers infolge der Verdampfung im Kathodenfleck ist der Stromstärke proportional und beträgt pro Ampsec $7,20 \cdot 10^{-3}$ g.

5. Um die insgesamt verdampfende Menge zu erhalten, ist zu der unter 4. angegebenen Menge noch die durch den Strom als Hg-Ionen zur Kathode transportierte Quecksilbermenge hinzuzurechnen. Diese beträgt $2,077 \cdot 10^{-3}$ g pro Ampsec, wenn der gesamte Strom an der Kathode durch Hg^{+} -Ionen transportiert wird, so daß insgesamt $9,28 \cdot 10^{-3}$ g Quecksilber in der Ampsec verdampfen.

6. Um $7,20 \cdot 10^{-3}$ g Quecksilber bei 100°C , der Siedetemperatur des Quecksilbers im Vakuum, zu verdampfen, sind 2,20 Wattsec erforderlich.

7. Aus vorstehenden Zahlen ergibt sich der gesamte Energieverlust im Kathodenfleck zu 4,92 bzw. 4,99 Wattsec, während nach Stark $5,27 \pm 0,09$ Wattsec zur Verfügung stehen. Es findet sich also fast die gesamte im Kathodenfall erzeugte Energie im Kathodenfleck wieder, woraus folgt, daß nahezu der gesamte Strom an der

Kathode durch Hg-Ionen und nur ein verschwindender Bruchteil durch Elektronen transportiert wird.

8. Der auf den Kathodenfleck von den ankommenden Hg-Ionen und den verdampfenden Hg-Atomen ausgeübte Druck beträgt etwa 2 Atm. Die Dichte des Quecksilberdampfes unmittelbar über dem Kathodenfleck entspricht einem Druck von 0,26 Atm.

9. Trotz ihrer geringen Zahl sind die von der Kathode ausgesandten Elektronen eine Existenzbedingung des Lichtbogens, weil ein Lichtbogen eine Entladungsform ist, in der nur die negativen Elektronen imstande sind, durch Stoß neue Ionen zu bilden, während die positiven Ionen diese Fähigkeit nicht besitzen.

10. Daß so sehr wenige Elektronen an der Kathode genügen, liegt wahrscheinlich daran, daß die Ionisierungsspannung der Hg-Atome durch die hohe Temperatur und die Lumineszenzstrahlung im Lichtbogen so weit heruntergesetzt ist, daß die Elektronen nach Durchlaufen des Kathodenfalles eine große Anzahl Hg-Atome zu ionisieren vermögen.