

Q. Das elektrische Bogenlicht und die Verwendung desselben zu Beleuchtungszwecken.

1. Konstruktion, Regulierung, Lampenspannungen, Schaltung der Bogenlampen, Nebenapparate und elektrische Messungen an denselben.

Je nachdem der Hauptstrom, der Nebenstrom oder beide regulierend auf das Bogenlampenwerk einwirken, bezeichnet man die Lampen als Hauptstrom-, Nebenschluß- oder Differentiallampen. Die Konstruktion der Lampe ist maßgebend für die Schaltungsweise im Leitungsnetz. So eignet sich die Hauptstromlampe — welche auf konstante Stromstärke reguliert wird — nur für Parallelschaltung; die Nebenschlußlampe — welche auf konstante Klemmenspannung reguliert wird — und die Differentiallampe — welche auf konstanten Widerstand reguliert wird — sind besonders für Hintereinanderschaltung zu verwenden. Die Differentiallampe hat gegenüber der Nebenschlußlampe die Vorteile, daß sie weniger Vorschaltwiderstand benötigt und die Dynamomaschine besser vor Überlastung bewahrt; ein Nachteil besteht darin, daß sie an eine bestimmte Stromstärke gebunden ist. Behufs näherer Erläuterung der Hauptschaltungen und Regulierung an Bogenlampen, will ich das Schema dreier Haupttypen der bekanntesten Bogenlampenfabrik von Körtling und Mathiesen¹⁾ herausgreifen. Bei der Hauptstromlampe für Gleichstrom ist die Regulierung höchst einfach. Der Regulierungsmagnet ist im Hauptstrom und eine Feder wirkt der Anziehung des Magneten in das Solenoid bis zu einem gewissen Grade entgegen, so daß der Kohlenabstand immer annähernd der gleiche bleibt. Da diese Lampen nur sehr wenig, allenfalls bei Scheinwerfern oder dgl. — nur immer in Einzelschaltung — in Frage kommen, so will ich nicht näher auf dieselben eingehen. Die Schaltung bei der Gleichstrom-Nebenschlußlampe ist gegeben durch Fig. 152. Der Schwebemagnet *a* steht in Zusammenhang mit dem um die Achse *d* schwingenden Laufwerk *c*, über deren unterste Rolle eine Kette läuft, welche beide Kohlenhalter beweglich hin- und herführt. Der Anker *b* ist in festem Zusammenhange mit dem Laufwerk und wird bei Einschaltung der Lampe in den seitlichen Einschnitt der Polschuhe hineingerückt; das Laufwerk und Rolle *d* bewegen sich infolge der Schwingung des Ankers auch und die Kohlenstifte werden zusammengeführt. Falls noch keine Berührung der Kohlenstifte eintritt, so wirkt das freigegebene Laufwerk durch Übergewicht des oberen Kohlenhalters, bis die Kohlen zusammentreffen; sodann wird der Magnet *a* stromlos, und die Feder *e* zieht den Anker *b*

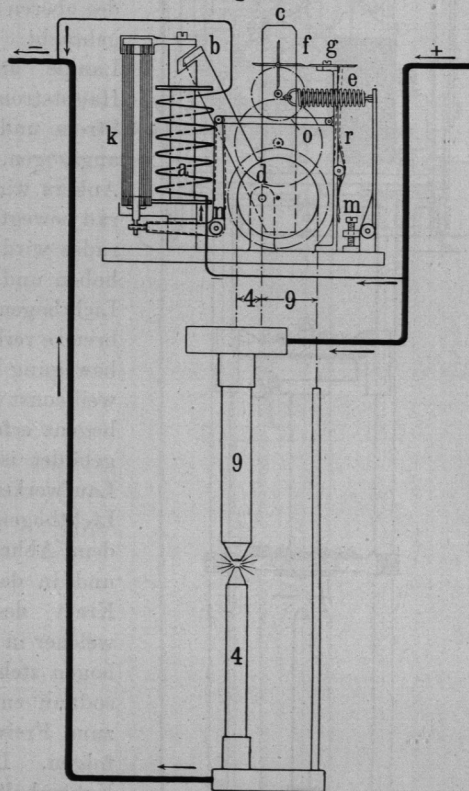
¹⁾ Siehe hierzu und zu folgendem das Buch über das Bogenlicht und seine Anwendung, herausgegeben von Körtling und Mathiesen.

zurück, es tritt Gleichgewicht zwischen magnetischer Anziehung und Federzugkraft ein und der Lichtbogen entsteht. Die Regelung des Nachschubes der Kohlenstifte erfolgt, indem der Anker *b* sich bei Maximalspannung der Lichtbogen so einstellt, daß das Flügelrad *f* von der Anschlagzunge *g* frei wird, wodurch langsam ein Zusammenfallen der Kohlenstifte eintritt, die alsbald durch Festhaltung des Flügelrades wieder aufhört. Ein Luftdämpfer reguliert die Ankerbewegung. Durch Anziehen und Nachlassen der Feder *e* — mittels der Schraube *m* — erfolgt die Regulierung

Fig. 152.

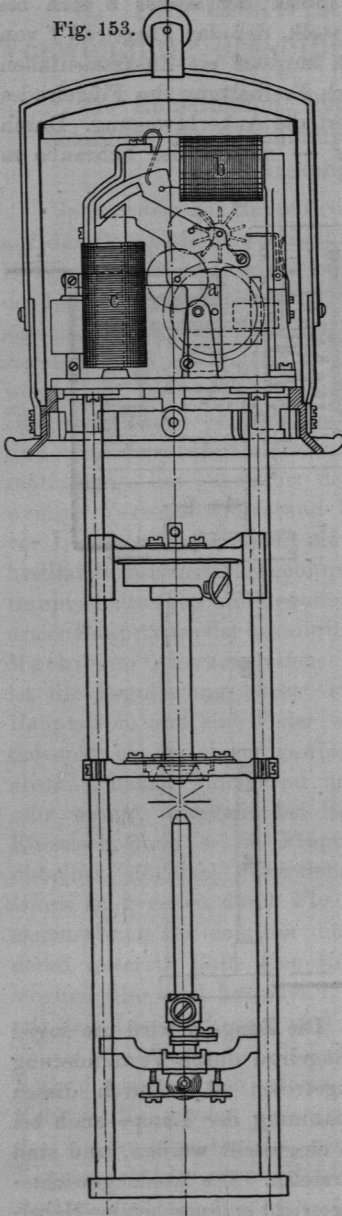
der Lichtbogenspannung. Durch die Wärme vom Lichtbogen erhöht sich der Nebenschlußwiderstand und schwächt die magnetische Kraft des Ankers *b*; es muß somit für dieselbe Stromstärke in der Nebenschlußwicklung, welche bei der Regulierung des Lichtbogens erforderlich war, eine höhere Klemmenspannung eintreten, daher wird die Lampe bei zunehmender Spulenerwärmung eine höhere Lichtbogenspannung annehmen. Diese Erhöhung der Lichtbogenspannung wird jedoch durch einen Wärmekompensator *k* vermieden, welcher aus einem Rohrsystem besteht, dessen äußerstes Rohr an dem Magnetsockel befestigt ist und dessen innerster Teil seine Bewegung durch Winkelhebel *n*, Zugstange *o*

und Zunge *g* auf den Hebel *r* überträgt. Die Zunge *g* wird um soviel zurückgedrängt, als Magnetanker und Flügelrad durch Verminderung der Kraftwirkung des Magneten zurückgetreten ist. Durch diesen Wärmeausgleich kann die Regulierungsspannung der Lampe auch bei kalten Spulen direkt auf das richtige Maß eingestellt werden, und sind nicht unbedeutende Stromersparnisse zu erzielen. Die Kohlengewichtsausgleichung erfolgt aus einem dem Kohlengewicht entsprechenden Hebelverhältnis; das Produkt aus Hebellänge und Kohlengewicht ergibt in jedem Stadium des Abbrandes der Kohlen die gleiche Größe.



Die Gleichstromdifferentiallampe, Fig. 153, enthält ein schwingendes Laufwerk *a*, um dessen Kettenrad die die Kohlenhalter tragende

Fig. 153.



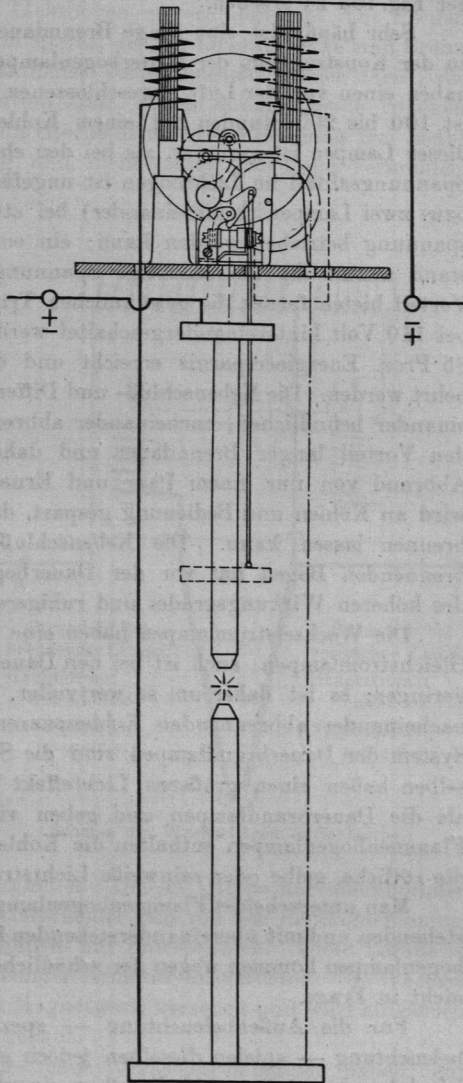
Kette gelegt ist, und einen mit dem Laufwerk direkt verbundenen schwebenden Anker zwischen dem Hauptstrom-*b* und Nebenschlußmagneten *c*, welche rechtwinkelig zueinander liegen. — Die Kohlenstifte werden im stromlosen Zustande der Lampe durch das Gewicht des oberen Kohlenhalters zur Berührung gebracht. — Bei Einschaltung der Lampe durchfließt die Spulen des Hauptstrommagneten *b* ein starker Strom und wird der Anker hierdurch angezogen. Durch die Anziehung des Ankers wird das Laufwerk und Kettenrad bewegt; durch Drehung des Kettenrades wird der obere Kohlenhalter gehoben und der untere gesenkt, und die Lichtbogenbildung erfolgt. Eine Luftbremse verhindert die zu schnelle Ankerbewegung bei Einschaltung der Lampen, weil sonst leicht ein Abreißen des Lichtbogens erfolgt. Sobald der Lichtbogen gebildet ist, liegt das Flügelrad des Laufwerkes auf der Anschlagzunge; die Lichtbogenspannung nimmt sodann mit dem Abbrande der Kohlenspitzen zu und in demselben Verhältnis auch die Kraft des Nebenschlußmagneten *c*, welcher in Parallelschaltung zum Lichtbogen steht. Die Ankerbewegung wird sodann entgegengesetzt der ersten bis zum Freiwerden des Flügelrades erfolgen. Das Übergewicht des oberen Kohlenhalters setzt sodann das Laufwerk in Bewegung und die Kohlenspitzen nähern sich. Hierdurch tritt eine Verminderung der Lichtbogenspannung ein und der Anker bewegt sich zum Hauptstrommagneten hin; das Flügelrad wird durch die Anschlagzunge wieder festgehalten. Die Anker-

bewegungen behufs Regulierung der Lampe erfolgen schnell und sind klein, so daß das Flügelrad nur eine viertel bis eine halbe Umdrehung

bei jedem Freiwerden vollführt. Der jeweilige Kohlennachschub ist durch die große Übersetzung des Laufwerkes sehr klein und mit dem Auge kaum festzustellen; dementsprechend ist auch die Lichtbogenspannungsdifferenz vor und nach der Regulierung der Lampe sehr gering.

Die Nebenschluß-Wechselstromlampe enthält eine Aluminiumscheibe, welche durch zwei sie umfassende Elektromagnete in Rotation versetzt wird. Die zwei Magnete — wovon einer im Hauptstrom- und der andere im Nebenschluß zum Lichtbogen liegt — induzieren in der Aluminiumscheibe Wechselströme, welche in der Phase um etwa 180° gegen die Magnetisierungsströme der Spulen verschoben sind. Hierdurch tritt ein Drehmoment auf die Scheibe ein; die Anordnung der Magnete ist so getroffen, daß der eine sich in Uhrzeigerrichtung und der andere sich im entgegengesetzten Sinne zu drehen sucht. Die Scheibendrehung wird durch ein Räderwerk auf das Kettenrad übertragen, wodurch die Kohlenhalter, welche an der Kette, die über das Kettenrad führt, befestigt sind, bewegt werden. Im normalen Zustande des Lichtbogens sind die auf die Scheibe ausgeübten Drehmomente einander gleich, so daß eine Drehung der Scheibe nicht eintritt und die Lage der Kohlen sich nicht verändert. Bei Zunahme der Lichtbogenspannung überwiegt das Drehmoment, welches durch den Nebenschlußmagneten induziert wird, und die Kohlen nähern sich einander. Bei Zunahme der Stromstärke über

Fig. 154.



ein bestimmtes normales Maß, wird durch den Hauptstrommagneten ein Drehmoment auf die Scheibe im entgegengesetzten Sinne ausgeübt und die Kohlen gehen mehr auseinander. Die Regulierung erfolgt somit gleichmäßig, geräuschlos und sicher. Alles Nähere ist aus vorstehender Fig. 154 zu ersehen.

Sehr häufig ist eine lange Brenndauer gewünscht; daher ist man zu der Konstruktion der Dauerbogenlampen übergegangen. Dieselben haben einen von der Luft abgeschlossenen Lichtbogen. Die Brenndauer ist 100 bis 200 Stunden mit einem Kohlenpaare. Der Wirkungsgrad dieser Lampen ist geringer, als bei den eben besprochenen Typen. Der Spannungsabfall im Lichtbogen ist ungefähr 80 Volt, so daß nur eine bzw. zwei Lampen (hintereinander) bei etwa 110 bzw. 220 Volt Netzspannung betrieben werden kann; ein entsprechender Vorschaltwiderstand nimmt die überschüssige Spannung auf. — Einen besonderen Vorteil bieten ferner die gewöhnlichen Triplexlampen, welche zu dreien bei 110 Volt hintereinandergeschaltet werden, damit kann etwa 25 bis 35 Proz. Energieersparnis erreicht und der Vorschaltwiderstand entbehrt werden. Die Nebenschluß- und Differentiallampen mit zwei nebeneinander befindlichen, nacheinander abbrennenden Kohlenpaaren haben den Vorteil langer Brenndauer und daher geringer Bedienung. Bei Abbrand von nur einem Paar und Erneuerung jeden Paares einzeln wird an Kohlen und Bedienung gespart, da man die Kohle bis zu Ende brennen lassen kann. Die Nebenschlußlampe mit zwei gleichzeitig brennenden Bogen hat vor der Dauerbogenlampe den großen Vorteil des höheren Wirkungsgrades und ruhigeren Lichtes.

Die Wechselstromlampen haben eine viel geringere Brenndauer als Gleichstromlampen; auch ist bei den Dauerbogenlampen der Lichteffect geringer; es ist daher um so wertvoller, Ersatzkohlenlampen mit zwei nacheinander abbrennenden Kohlenpaaren zu besitzen. — Nach dem System der Dauerbrandlampen sind die Sparbogenlampen gebaut; dieselben haben einen größeren Lichteffect bei gleichem Energieaufwand als die Dauerbrandlampen und geben viel ruhigeres Licht. Bei den Flammenbogenlampen enthalten die Kohlenstifte bestimmte Metallsalze, die rötliche, gelbe oder reinweiße Lichtstrahlen entsenden.

Man unterscheidet Flammenbogenlampen mit schräg nebeneinanderstehenden und mit übereinanderstehenden Effektkohlen. Diese Flammenbogenlampen kommen wegen der schädlichen Gase für Innenbeleuchtung nicht in Frage.

Für die Außenbeleuchtung — speziell Straßen- und Bahnhofsbeleuchtung — spielen dieselben jedoch eine sehr große Rolle und will ich daher hier näher auf dieselben eingehen, zumal die Projektierung und Prüfung dieser Beleuchtungsanlagen in direktem Zusammenhang mit der Prüfung der einzelnen Teile der Zentrale stehen.

Als Vertreter dieser Lampentypen, welche sich besonders für Außenbeleuchtung eignen, lasse ich hier die Excello- bzw. Axislampe mit

kurzer Beschreibung folgen. Die Kohlen der ersteren Lampe stehen nebeneinander, und zwar mit den Brennspitzen nach unten, und werden durch ein Differentialgetriebe und zwar durch axiale und seitliche Bewegung der Kohlen sehr gut reguliert, so daß auch bei schwankender Netzspannung ein normaler Lichtbogen zu erhalten ist. Die Kohlen-
spitzen befinden sich in einem Sparer, der die Lichtausbeute und Brenndauer begünstigt. Ein wesentlicher Vorteil besteht ferner darin, daß durch entsprechende Ventilation bzw. durch entsprechende Glockenanordnung mit Aschenteller die Glocke dauernd von Beschlag frei bleibt; hierdurch werden Bedienung und Lichtverlust bedeutend vermindert.

Auf die Beleuchtungsvorteile dieser Lampe komme ich später unter dem Abschnitt „Photometrische Messungen“ noch zurück.

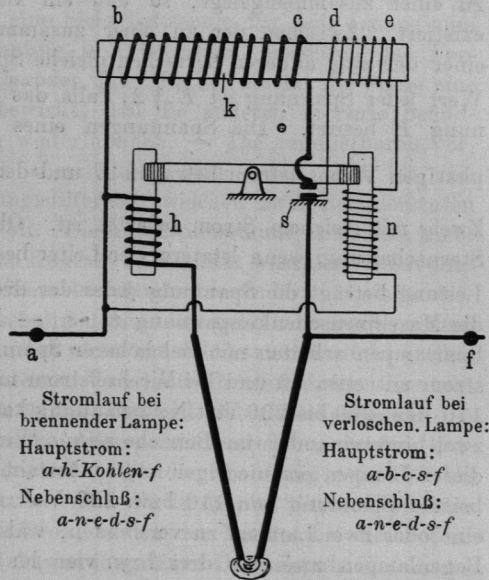
Die Lampe ist für Gleich- und Wechselstrom, in letzterem Falle als Magnetlampe gebaut; hier tritt bei der Regulierung auch eine Längs- und Seitenbewegung der Kohlen ein. Das Schaltungsschema

Fig. 155 gibt alles Nähere an. Energieverbrauchende Ersatzdrosselspulen kommen hier in Wegfall. Nach Abbrand der Kohlen schaltet sich der Ersatzwiderstand automatisch ein und leistet die zum Festhalten des Schalters *s* erforderliche höhere Spannung für den Nebenschlußmagnet *u*.

Die Axislampe hat übereinanderstehende Effektkohlen und unterscheidet sich von den Reinkohlenlampen mit übereinanderstehenden Kohlen nur unwesentlich. Diese Lampe ist ebenfalls mit beschlagfreieibender Armatur ausgerüstet. Die Wechselstrom-Axislampe ist auch mit Magnetwerk versehen und wird als Serienlampe mit Ersatzwiderstand gebaut.

Die gewöhnlichen Gleich- bzw. Wechselstromlampen haben, entsprechend der Stromstärke, Spannungen von 40 bis 45 bzw. 29 bis 36 Volt. Bei 110 Volt schaltet man somit zwei Gleichstromlampen hintereinander mit einem gemeinschaftlichen Widerstande, der etwa 20 bis 30 Proz. der gesamten Energie aufzehrt. Die Betriebsspannung im Wechselstrombetrieb muß bei Differentiallampen in größeren Reihen 34 Volt,

Fig. 155.



Schema der Wechselstrom-Serienlampe.

bei Nebenschlußlampen 38 Volt pro Lampe betragen. Einige Wechselstromlampen brauchen sehr wenig Vorschaltwiderstand und können bei 120 Volt zu vierein hintereinander geschaltet werden. Mehrere Firmen bauen Gleichstromlampen, welche bei 110 Volt zu dreien hintereinander ohne Vorschaltwiderstand geschaltet werden können; es bedarf hierzu nur eines Anlaßwiderstandes, dessen Kontakthebel bei Einschaltung langsam auf Kurzschlußkontakt zu bringen ist. — Der getrennte zweiphasige Wechselstrom beansprucht vier Leitungen — die Phasen stehen um 90° zueinander —, von welchen immer zwei Leitungen ein Einphasensystem — dessen Strom- und Spannungsphasen nicht zusammenfallen — ergeben. Aus Kostenersparnis werden zwei Leitungen zu einer zusammengelegt, so daß ein verkettetes Zweiphasensystem existiert. Zwischen der zu einer zusammengelegten Leitung und je einer der zwei anderen herrschen gleiche Spannungen. Dieser effektive Wert jeder Spannung ist $E\sqrt{2}$, falls das getrennte System die Spannung E besitzt. Die Spannungen eines Dreileitersystems für dreiphasigen Wechselstrom betragen E und der Strom ist $\frac{J}{\sqrt{3}}$, wenn jeder

Zweig mit gleichem Strom belastet ist. Obiges gilt für Dreieck- und Sternschaltung, wenn letztere vier Leiter besitzt. Bei Fehlen der vierten Leitung beträgt die Spannung jedes der drei Systeme $= E\sqrt{3}$, wenn die Maschinenschenkelspannung E ist. — Die Dauerbrandlampen und Sparlampen arbeiten mit viel höherer Spannung, und zwar bei Gleichstrom mit etwa 80 und bei Wechselstrom mit etwa 70 Volt; bei 100 bis 110 bzw. 200 bis 220 Volt Netzspannung kann somit nur eine bzw. nur zwei hintereinander im Betriebe sein. Wengleich der Wirkungsgrad dieser Lampen ein niedriger ist, so besteht doch der Vorteil, daß man bei der Spannung von 110 bzw. 220 Volt nicht genötigt ist, mehr als eine oder zwei Lampen zu verwenden, während man bei gewöhnlichen Bogenlampen zwei bis drei bzw. vier bis fünf gleichzeitig betreiben müßte. Die Flammenbogenlampen mit nebeneinanderstehenden Kohlen werden bei Gleichstrom und Wechselstrom mit etwa 44 bis 47 Volt betrieben, während bei übereinanderstehenden Kohlen die Spannungen 30 bis 40 Volt betragen. Erstere werden bei 110 Volt zu zweien hintereinander und letztere — je nach der Spannung 30 oder 40 Volt — zu dreien bzw. zweien hintereinander betrieben.

Mit wenig Worten will ich hier noch auf die erforderlichen Zubehörteile zu den Bogenlampen eingehen. Um zu vermeiden, daß beim Erlöschen einer der hintereinander geschalteten Bogenlampen die Nebenschlußspulen oder dgl. verbrennen, wird ein Minimalausschalter verwendet, welcher den Stromkreis bei übermäßig langem Lichtbogen einer Lampe ausschaltet. Auch wird der Stromkreis automatisch ausgeschaltet, falls beim Ausbrennen einer Lampe die Stromstärke auf ein gewisses, der Justierung des Minimalausschalters entsprechendes Maß gesunken

ist. Der Minimalausschalter muß vom Maschinisten kontrolliert werden können. Bei Gleichstrom-Nebenschlußlampen von 5 bis 15 Amp. bis 250 Volt bzw. Gleichstrom-Differentiallampen unter gleichen Betriebsverhältnissen, wenn die Verlustspannung im Minimum 25 Proz. der Verbrauchsspannung der in Serie geschalteten Lampen beträgt, ist die Anwendung des Minimalauschalters zweckmäßig, falls beim Verlöschen einer Gleichstrom-Differentiallampe die anderen in Serie ohne Störung weiterbrennen sollen, und zum Schutze der Nebenschlußspulen und Sparer dienen selbsttätige Umschalter mit Ersatzwiderständen. Bei Berühren der Kohlenspitzen erfolgt die Umschaltung auf den Ersatzwiderstand, der zu jeder Lampe parallel geschaltet ist, automatisch; die anderen Lampen in der Serie brennen ruhig weiter. Bei Wechselstromlampen, die in Serie brennen, dient eine Sicherheitsspule für jede Lampe zum Schutze vor zu hoher Spannung und vermeidet hierdurch das Verbrennen der Nebenschlußspule oder dgl. Ferner ersetzt die Spule eine Ersatzdrosselspule, welche bewirkt, daß die anderen in Serie befindlichen Lampen ohne Störung weiterbrennen. — Die regulierbaren Vorschaltwiderstände sind nicht ausschaltbar und haben drei bis vier Regulierstufen. Die Spannungsdifferenz zwischen zwei Regulierstufen beträgt ungefähr 10 bis 12 Volt. Die Anlaßwiderstände sind auch nicht ausschaltbar. Bei Stellung von Kontakt zu Kontakt wird der Widerstand etwa um $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{5}$ des Gesamtwiderstandes verändert. Anlaßwiderstände können auch zu Vorschaltwiderständen gebraucht werden; man muß dann jedoch die Anlaßkurbel nicht auf den letzten Kontakt stellen und entsprechend dem gewünschten Vorschaltwiderstande einen Kontakt wählen, auf welchem die Anlaßkurbel dauernd stehen bleiben muß.

Um eine einzelne Wechselstromlampe zu betreiben, werden Umformer (Transformatoren) verwendet, die die Spannung von 100 bis 120 Volt in 40 bis 80 umsetzen. Der Wirkungsgrad dieser Umformer ist hoch und beträgt etwa 92 Proz., so daß der Verlust bei dieser Umformung geringer ist wie bei Anwendung einer Drosselspule.

Die elektrischen Messungen an Bogenlampen beziehen sich lediglich auf Feststellung der jeweiligen Ampere, Volt und des Wattverbrauches während des Betriebes der Lampen. Aus diesen Daten, welche während etwa 10 bis 15 Minuten etwa alle 30 Sekunden notiert werden müssen, läßt sich ein Urteil über die Brauchbarkeit und Zweckmäßigkeit der Lampe fällen. Vor den Messungen müssen die Lampen sorgfältig einreguliert werden. Die Bogen- und Kohlenlänge, sowie die Augenblicke des Nachregulierens sind ebenfalls sorgfältig zu notieren. Die Prüfungen müssen bei verschiedenen Kohlenlängen angestellt werden; auch ist es ratsam, die Stromstärken nicht nur mit dem Normalwert, sondern auch in kleinen Grenzen unter und über dem Normalwerte zu verändern. Die Einzelmessungen, sowie das Gesamtergebn läßt sehr leicht ein Urteil über Regulierung und Wirkungsweise der Lampen erkennen. Die Messungen sind so einfacher Natur, daß eigentlich keine Beispiele

erforderlich sind; ich will aber der Vollständigkeit halber hier die Resultate einer Messung an einer Lampe von 6 Amp. Stromstärke anführen:

Lichtbogenlänge im Mittel in mm		Stromstärke in Amp. im Mittel		Spannung in Volt im Mittel	
1,02		6,1		42,5	
Schwankungen		Schwankungen		Schwankungen	
Max.	+ 13 Proz.	Max.	+ 2,6 Proz.	Max.	+ 3 Proz.
und	— 12 „	und	— 1,8 „	und	— 1,7 „
Mittel	+ 5,1 „	Mittel	+ 0,7 „	Mittel	+ 0,7 „

Die Einzelwerte lassen sich auch in graphischer Darstellung aufzeichnen und man ersieht sodann aus den Amp.-, Volt- und Voltamp.-Kurven die Schwankungen in jedem einzelnen Momente und kann sich sofort ein Urteil über die Regulierung und Wirkungsweise der Lampe bilden.

2. Photometrische Messungen und rechnerische Ermittlungen über Bogenlampenbeleuchtung in geschlossenen Räumen, sowie auf Straßen und Plätzen.

Die Lichtausstrahlung des Bogenlichtes hängt von der Konstruktion der Bogenlampe, der Stromart und der Beschaffenheit der Kohlen ab. Es soll nicht meine Aufgabe sein, über die Ausstrahlungskurve der verschiedenen Bogenlampenarten hier zu berichten, sondern ich will speziell mich mit den für die Praxis wertvollen indizierten Helligkeiten bzw. Horizontalbeleuchtungen der verschiedenen Beleuchtungsarten beschäftigen und verweise bezüglich der Ausstrahlungskurven und anderer wissenschaftlicher Momente auf die vielen wertvollen Arbeiten vornehmlich von Herrn Prof. Dr. Wedding und auch anderen. Die Güte einer Beleuchtungsanlage hängt von der Lichtverteilung, Lichtstreuung, der Flächenhelle und Beleuchtungsstärke ab. Für praktische Beleuchtungszwecke kommen nur die Beleuchtungsstärke, Lichtverteilung und -streuung in Frage. Die Stärke der Beleuchtung ermittelt sich am besten mit dem Webersehen Photometer; ich werde darauf, sowie auf die Meßart und Beispiele über photometrische Messungen später zurückkommen. Bezüglich der Meßeinrichtungen verweise ich hier auf die Arbeiten in der E. T. Z. von Ulbricht 1907, S. 304 u. 777, und 1908, Heft 1.

Rechnerisch ergibt sich die Beleuchtungsstärke E aus der Lichtstärke J dividiert durch das Quadrat des Lampenabstandes R ; für die Beleuchtung einer Fläche, welche zum Lichtstrom senkrecht steht, ist die Beleuchtungsstärke $E_n = \frac{J}{R^2}$. Handelt es sich um größere horizontale

Flächen, so ist es zweckmäßiger, den Lichtstrom für eine bestimmte Horizontalfläche F zu bestimmen und es besteht sodann $E_m = \frac{\Phi}{F} = \frac{J_m \cdot \omega}{F}$;