

D 15

**DIE LICHTMODULATION DER
QUECKSILBERHOCHDRUCKENTLADUNG
ZWISCHEN 50 Hz UND 100 khz**

VON

HERBERT MANGOLD

AUZ ZEITZ

SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG GMBH · 1940

D 15

DIE LICHTMODULATION DER
QUECKSILBERHOCHDRUCKENTLADUNG
ZWISCHEN 50 Hz UND 100 kHz

VON

HERBERT MANGOLD

AUS ZEITZ

ISBN 978-3-662-37230-2 ISBN 978-3-662-37954-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-37954-7

Sonderdruck aus Elektrische Nachrichtentechnik 1940, Heft 3
(Verlag von Julius Springer, Berlin W 9)

Die Lichtmodulation der Quecksilberhochdruckentladung zwischen 50 Hz und 100 kHz.

(Mitteilung aus dem Physikalischen Institut der Universität Leipzig, Abteilung für Angewandte Elektrizitätslehre, Abteilungsvorstand Professor Dr. A. Karolus.)

Von H. Mangold, Leipzig¹⁾.

DK 621. 327. 312
621. 396. 613. 029. 4. 52

Inhalt:

- Einleitung.
- I. Meßobjekte.
- II. Die Erzeugung modulierten Lichtes.
- III. Meßverfahren und Meßanordnungen.
- IV. Meßergebnisse.
- V. Deutung der Meßergebnisse.
- Zusammenfassung.
- Schrifttum.

Einleitung.

Unter der Modulation des Lichtes einer Lichtquelle versteht man die Steuerung der Intensität dieses Lichtes in einem vorgegebenen Rhythmus. Die Verwendbarkeit von Metalldraht-Glühlampen üblicher Bauweise für Frequenzen von einigen hundert Hertz ist wegen der großen Wärmeträgheit des Glühfadens stark eingeschränkt [1]²⁾. Infolgedessen rücken als modulierbare Lichtquellen diejenigen in den Vordergrund, die an Stelle der Temperaturstrahlung mehr oder weniger ausgedehnter fester Körper die Lichtemission hochoberflächiger oder elektrisch angeregter Gase ausnutzen. Das ist in den elektrischen Gasentladungen der Fall. Die Modulation des Lichtes der Glimm- und Bogenentladung ist schon mehrfach der Gegenstand physikalischer Untersuchungen oder praktischer Anwendung gewesen. Die Glimmlampe tritt wegen der geringen umsetzbaren Leistung und ungünstiger optischer Eigenschaften (kleine Leuchtdichte) zurück. Dagegen wird die Lichtmodulation des klassischen Kohlebogens in freier Luft in den Arbeiten von W. Duddell [2], H. Th. Simon [3], E. Ruhmer [4] und J. Jaumann [5] eingehend behandelt. Jaumann insbesondere hat genaue Messungen der Frequenzabhängigkeit der Lichtmodulation durchgeführt.

Neben dem Kohlebogen hat neuerdings die Quecksilberbogenentladung unter hohem Druck (20 bis 100 at) Eingang in die Lichttechnik gefunden. Elektrodenabbrand und Instabilität infolge Wanderns des Kraters sind bei ihr vermieden. Sie gestattet die Erzeugung sehr hoher Leuchtdichten bis über 100000 Stilb und die Umsetzung ähnlicher Leistungen wie der Kohlebogen. Über die Modulation des Quecksilberdampflichtes sind Arbeiten von Q. Majorana [6] mit qualitativen Angaben über das Verhalten von Niederdruckentladungen und ihre Brauchbarkeit für Lichttelefonie, von W. Elenbaas [7] im Zusammenhang

mit der Deutung der dynamischen Charakteristiken des Quecksilberhöchstdruckbogens und von E. G. Andresen [8] im Hinblick auf die Flimmerfreiheit von Quecksilberlicht bei Wechselstromspeisung mit 50 Hz veröffentlicht worden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Erzeugung und die Eigenschaften des intensitätsmodulierten Lichtes von Quecksilberhochdruckentladungen im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 kHz untersucht. Der erste Teil der Arbeit enthält eine Beschreibung der von der „Studiengesellschaft für elektrische Beleuchtung“ im Osram-Konzern zur Verfügung gestellten Quecksilberdampflampen, während im zweiten Teil nach einer Prüfung der für die Lichtmodulation möglichen Schaltungen die benutzte Anordnung dargestellt wird. Im dritten Teil folgt eine Übersicht über die ausgeführten Messungen und die dazu benutzten Geräte. Im vierten Teil sind die Meßergebnisse zusammengestellt, deren Deutung im fünften Teil gegeben wird.

I. Meßobjekte.

a) Mittel- und Hochdrucklampen für Beleuchtungszwecke.

Die handelsüblichen Osram-Lampen HgH 1000 und HgQ 300 gehören nicht zu den Quecksilberhochdruckentladungen im engeren Sinne, da der in den Gefäßen herrschende Betriebsdruck nur etwa 1 bzw. 10 at beträgt. Sie sind in die Untersuchung einbezogen worden, um den Einfluß des Quecksilberdampfdruckes zu erfassen. Eine genauere Beschreibung dieser Lampen findet man bei Uytendoeve [9] und in den Druckschriften des Osram-Konzerns [10]. Mit beiden Lampen sind einige orientierende Messungen durchgeführt worden.



Abb. 1. Osram-Lampe Hg B 500 W.

b) Höchstdrucklampen.

Die ersten Messungen sind mit einer Versuchsausführung einer Kugellampe [11] durchgeführt worden, deren jetzige Bauform (Type Hg B 500 W) Abb. 1

¹⁾ D 15. ²⁾ Schrifttum siehe S. 69.

zeigt. Diese Lampen bestehen aus starkwandigen Quarzgefäßen, in die die entladungsgeheizten Oxydelektroden im Abstand von etwa 5 mm eingeschmolzen sind. Die Leistungsaufnahme beträgt 500 W. Die Zündung wird mit einem Spannungstoß aus einem Hochfrequenzinduktor in einem Edelgas geeigneten Druckes eingeleitet. Die Temperatur an der Innenwand des Quarzgefäßes beträgt rund 800° und in der Achse der Entladung etwa 8000°. Bemerkenswert ist die hohe Leuchtdichte von etwa 30000 Stilb, die in vielen optischen Anordnungen von großem Wert ist. Der überhitzte Quecksilberdampf steht im Temperaturgleichgewicht unter einem Druck von 35 at. Für genaue Messungen ist die Abhängigkeit des Quecksilberdampfdruckes von der zugeführten Leistung und den Kühlverhältnissen störend. Diese Schwierigkeit wird durch die von Rompe und Thouret [11] entwickelte

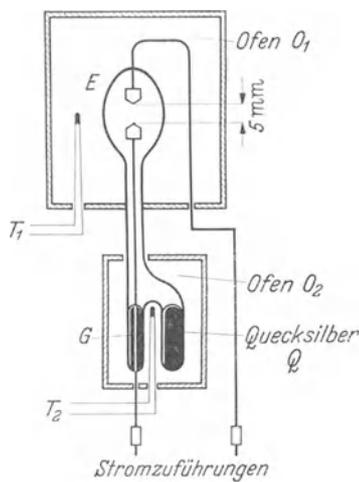


Abb. 2. Meßlampe mit Heizöfen.

Meßlampe (Abb. 2) beseitigt, da an Stelle des überhitzten Dampfes gesättigter Dampf verwendet wird, dessen Druck durch die Temperatur T_2 eines Vorratsgefäßes G mit flüssigem Quecksilber Q eindeutig bestimmt ist. Der Druck läßt sich mit der Ofenheizung im Bereich von 1 bis 60 at ändern. Mit dieser Lampe ist die Mehrzahl der Messungen durchgeführt worden, da sie alle Anforderungen hinsichtlich der Einstellbarkeit und Reproduzierbarkeit der Meßparameter erfüllt.

Um höhere Dampfdrucke zu erreichen, ist eine Verkleinerung der Gefäßabmessungen, des Elektrodenabstandes und damit der umgesetzten Leistung not-

wendig. Es sind Messungen mit einer 200 W-Kugellampe besonders im Hinblick auf die Eigenschaften des sehr kurzen Bogens von nur 1,5 mm Länge durchgeführt worden.

Bei den bisher beschriebenen Lampen reißt der Bogen bei Schaltstößen oder auch nur sehr kurzzeitigen Stromunterbrechungen außerordentlich schnell ab. Dies ist aus zwei Gründen unerwünscht: einerseits vergehen einige Minuten, bis die Lampe wieder zündfähig wird, andererseits kann eine Gefährdung bestimmter Schaltelemente eintreten (vgl. Abschn. II b). Eine gewisse Sicherheit gegen das Abreißen gewährleistet die Doppellampe [25], die mit zwei Entladungsstrecken A_1K_1 und A_2K_2 von je 500 W gebaut worden ist, um in einem Gefäß die Leistung von 1 kW unterzubringen (Abb. 3). Sie gestattet die Verwendung einer Strecke als modulierte Entladung, während die andere als unmodulierte Hilfsentladung zur Aufrechterhaltung einer

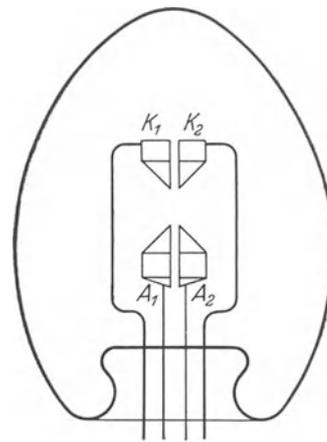


Abb. 3. Doppellampe.

gewissen Vorionisierung benutzt wird. Das Licht der letzteren muß ausgeblendet werden. Die gegenseitige Beeinflussung der Entladungen ist wegen ihres geringen Abstandes voneinander noch störend.

Das Abreißen des Bogens ist in einer neu entwickelten Lampe mit Hilfsentladung praktisch vermieden. Die Anode ist beiden Entladungen gemeinsam. Neben der Hauptkathode ist eine Hilfskathode angeordnet. Die Hauptentladung ist für 500 W bemessen, während die Hilfsentladung etwa 40 W aufnimmt. Die beiden letztgenannten Lampen sind zur Untersuchung der maximal erreichbaren Lichtmodulation benutzt worden.

Tafel 1. Meßobjekte, betriebs- und lichttechnische Eigenschaften.

Type	N in W	U in V	I in A	int. Lm.	B in Stilb	Ausbeute i. Lm./W.	Bogenlänge in mm	Gefäß- durchmesser in mm	ϕ in at
HgH 1000	265	120	2,2	10000	250	38	100	30	1
HgQ 300	75	100	0,75	3000	1000	40	22,5	10	10
HgB 500 W	500	70	7	22000	30000	44	5	30	35
Meßlampe	900	110	8	50000	bis 60000	50	5	25	bis 60
Kugellampe kl. Lstg.	200	33	6	13000	70—90000	65	1,2—1,5	20	50
Doppellampe	wie 2 • HgB 500 W								
L. mit Hilfsentldg.:									
a) Hauptentldg.	wie 1 • HgB 500 W								
b) Hilfsentldg.	35	88	0,4						

Allen hier aufgeführten Quecksilberdampf lampen sind zwei Eigenschaften gemeinsam, die für die Lichtmodulation von Bedeutung sind:

1. der Lichtstrom steigt in erster Näherung proportional mit dem durchfließenden Speisestrom nach Rompe und Thouret [11];
2. die statische Kennlinie der Entladung ist im Bereich kleiner Stromstärken (im Vergleich zur Nennstromstärke) fallend und verläuft dann horizontal oder sehr flach ansteigend (Abb. 4).

Die betriebs- und lichttechnischen Eigenschaften der untersuchten Lampen sind in Tafel 1 zusammengestellt.

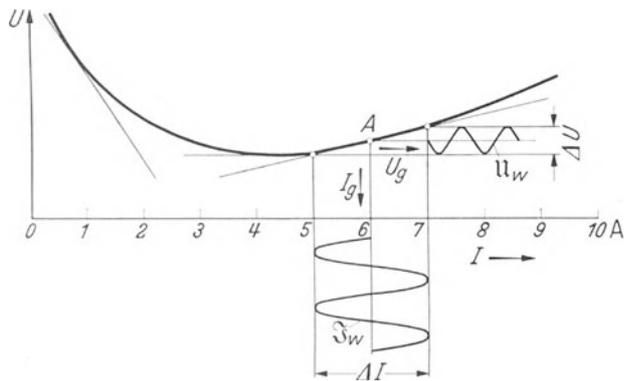


Abb. 4. Statische Strom-Spannungskennlinie (schemat.).

II. Die Erzeugung modulierten Lichtes.

a) Zur Erzeugung intensitätsmodulierten Lichtes mittels eines Quecksilberbogens sind drei Anordnungen möglich:

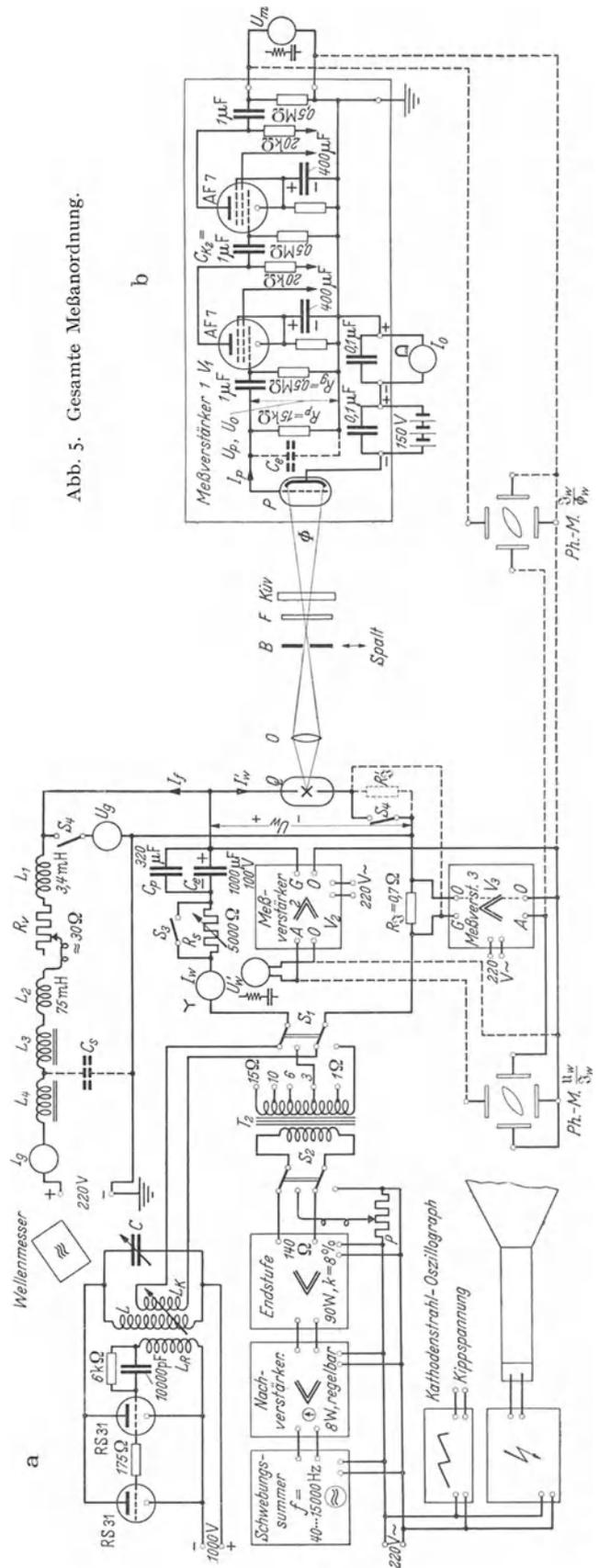
1. man speist den Bogen mit reinem Wechselstrom;
2. man nutzt die fallende Strom-Spannungskennlinie (Abb. 4) der Entladung zur Anfachung elektrischer Schwingungen aus, die die Stärke des ausgestrahlten Lichtes modulieren (Duddell-Schaltung);
3. man überlagert dem Speisegleichstrom einen aus einem getrennten Generator entnommenen Wechselstrom nach Art der Amplitudenmodulation in der Hochfrequenztechnik.

Das Verfahren 1 hat den Vorzug, daß keine Gleichstromquelle benötigt wird, jedoch ist wohl zu beachten, daß die Wechselstromquelle die gesamte, für den normalen Betrieb notwendige Leistung von etwa 0,5 kW aufbringen muß. Das ist praktisch nur mit dem Wechselstromnetz oder Maschinen möglich. Daher kann man immer nur mit einer Frequenz modulieren. Die mit dem Verfahren 2 erhaltenen Schwingungen sind schwach, instabil und schwer reproduzierbar, so daß sie für Messungen nicht brauchbar sind. Das Verfahren 3 beruht auf dem am Ende des Abschnittes I ausgesprochenen linearen Zusammenhang zwischen dem Speisestrom I_g und dem Lichtstrom Φ . Überlagert man dem ersteren einen Wechselstrom \mathfrak{S}_w , so schwankt der Lichtstrom in gleichem Maße um den Ruhewert Φ_0 , man erhält also eine Modulation des Lichtstromes Φ . Aus der Kennlinie in Abb. 4 geht hervor, daß diese Überlagerung nur kleine Spannungs-

variationen u_w am Bogen zur Folge hat. Daher ist die aufzuwendende effektive Modulationsleistung

$$N_w = \frac{u_w \cdot \mathfrak{S}_w}{2} \cdot \cos \varphi_w$$

Abb. 5. Gesamte Meßanordnung.



verhältnismäßig klein und steht in keinem Zusammenhang mit der Gleichstromleistung $N_g = U_g \cdot I_g \approx 0,5 \text{ kW}$, die für den optimalen Betrieb der Entladung gebraucht wird.

b) Der Gleichstromkreis der ausgeführten Schaltung (Abb. 5a) ist normal, die Drosselspulen $L_1 \dots L_4$ verhindern ein Rückfließen des Wechselstromes über die Gleichstromquelle, das besonders bei Phasemessungen zu Fehlern Anlaß gibt (vgl. Abschn. III b).

Zur Überstreichung des Frequenzbandes von 50 Hz bis 100 kHz sind zwei Wechselstromerzeuger notwendig. Im Tonfrequenzbereich von 50 Hz bis 15 kHz wird ein Schwebungssummeerzeuger [12, 13] mit Nachverstärkern verwendet, die für längerdauernde Messungen bei 50 Hz durch das Wechselstromnetz ergänzt werden. Die Endstufe kann in B-Schaltung 150 W, in A-Schaltung 90 W abgeben. Für das Frequenzband von 20 kHz bis 100 kHz steht ein Hochfrequenzsender mit 2 Röhren RS 31 und einer Leistung von 90 W zur Verfügung.

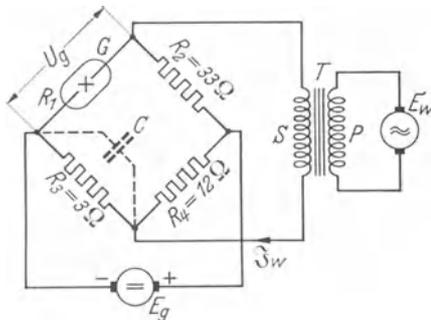


Abb. 6. Schaltung für Wechselstromüberlagerung (Brücke).

Schwierigkeiten bereitet die Kopplung zwischen dem Gleichstrom- und dem Wechselstromkreis. Bei Parallel-Schaltung beider Kreise ist ein Kondensator notwendig, der die Betriebsgleichspannung der Lampe von 60 Volt vom Transformator T_2 (Abb. 5a) fernhält und dessen Wechselstromwiderstand klein gegen den des Bogens sein soll. Die Verhältnisse liegen sehr ungünstig, da der Wechselstromwiderstand der Entladung für 50 Hz in der Größenordnung von $0,3 \Omega$ liegt. Ein Kondensator mit demselben Blindwiderstand hat eine Kapazität von $10000 \mu\text{F}$. In der vorliegenden Schaltung werden ein Papierkondensator C_p von $320 \mu\text{F}$ und ein parallelgeschalteter Elektrolytkondensator C_e von $1000 \mu\text{F}$ mit 100 Volt Betriebsspannung benutzt. Ein Verlöschen des Bogens muß vermieden werden, weil die Gleichspannung U_g an C_e sofort von 60 Volt auf 220 Volt steigt und zur Zerstörung von C_e führt. Eine Umgehung des Kondensators durch eine Serienschaltung von Gleich- und Wechselstromquelle ist nicht möglich, da der Modulationsstrom I_w sowohl durch den Vorschaltwiderstand R_p von 30Ω als auch durch den Innenwiderstand der Gleichstromquelle fließen muß. Als Ausweg sei noch eine Gleichstrom-Brückenschaltung (Abb. 6) erwähnt, in der der Modulationsstrom I_w in den Nullzweig eingeführt wird, um die Wechselstromquelle E_w

von der Gleichspannung U_g zu entlasten. R_2 ist der Vorwiderstand für die Entladung, R_3 muß möglichst klein gehalten werden, da dieser Widerstand im Modulationskreis liegt. Die Gleichstromquelle wird allerdings durch $R_3 + R_4$ mit $3,3 \text{ kW}$ unnützlich belastet.

III. Messungen und Meßverfahren.

a) Die Gleichstromeigenschaften der Entladung werden durch die Aufnahme der statischen Kennlinie bei konstantem Dampfdruck ermittelt. Man erhält hieraus den Gleichstromwiderstand $R_g \left(\frac{U_g}{I_g} \right)$ und den differentiellen Widerstand $R_d \left(\frac{\Delta U}{\Delta I} \right)$ für sehr langsame Stromänderungen.

b) Die Wechselstromeigenschaften werden durch den Wechselstromwiderstand R_w , dessen Betrag $|R_w|$ und dessen Phasenwinkel φ_w gekennzeichnet. Die Messung des Phasenwinkels erfolgt mit einem Kathodenstrahloszillographen (Abb. 5a), dessen senkrechtem Plattenpaar die Wechselfspannung U_w und dessen waagrechtem Plattenpaar eine \mathfrak{F}_w entsprechende Wechselfspannung zugeführt wird. Die letztere wird an einem induktionsfreien Widerstand erzeugt und durch den Verstärker V_3 verstärkt. Die auf dem Leuchtschirm entstehende Lissajousfigur, im allgemeinen eine schiefliegende Ellipse, wird in einem rechtwinkligen Koordinatensystem ausgewertet nach Alberti [14]. Die Meßgenauigkeit beträgt bei kleinen Winkeln 1° , in der Umgebung von $\pi/2$ nur 5° . Die in der Schaltung und in den Meßverstärkern auftretenden Phasenfehler müssen entweder unter diesen Grenzen bleiben oder festgestellt und berücksichtigt werden [19].

c) Die Messung der Größe der Lichtmodulation erfolgt in Anlehnung an die Methoden der Hochfrequenztechnik [15, 16] durch die Bestimmung des Lichtmodulationsgrades m_L des Lichtstromes Φ , der symmetrisch um den Mittelwert Φ_0 zwischen den Endwerten Φ_{\max} und Φ_{\min} schwankt. Der Lichtmodulationsgrad wird definiert durch:

$$m_L = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_0}{\Phi_0} = \frac{\Phi_0 - \Phi_{\min}}{\Phi_0} = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2\Phi_0}. \quad (1)$$

Häufig ist Φ_0 der Messung nicht zugänglich. Unter Berücksichtigung, daß bei der hier vorausgesetzten Symmetrie

$$\Phi_0 = \frac{\Phi_{\max} + \Phi_{\min}}{2} \quad (2)$$

ist, folgt aus Gl. (1):

$$m_L = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{\Phi_{\max} + \Phi_{\min}}. \quad (3)$$

Zur Messung des Lichtmodulationsgrades wird der Lichtstrom Φ (Abb. 5b) durch eine Photozelle P in einen entsprechenden Photostrom I_p umgewandelt, der an einem in den Photostromkreis eingeschalteten Widerstand R_p die mittlere Gleichspannung U_0 und die überlagerte Wechselfspannung $U_p \cdot \sqrt{2}$ erzeugt. Der Lichtmodulationsgrad ergibt sich als:

$$m_L = \frac{U_p \sqrt{2}}{U_0} \cdot 100\%. \quad (4)$$

U_0 bestimmt man aus dem Photogleichstrom I_0 und R_p , U_p durch Messung der Ausgangsspannung des geeichten Meßverstärkers V_1 . Für hohe Frequenzen wirkt als Belastungswiderstand der hochohmigen Photozelle der Scheinwiderstand der Parallelschaltung der Widerstände R_p und R_g und der Eingangskapazität $C_e = 16$ pF einschließlich Photozelle. Diese Korrektur wird rechnerisch berücksichtigt.

Infolge der Proportionalität zwischen dem Speisestrom I_g und dem Lichtstrom Φ ist es zweckmäßig, bei Überlagerung des Wechselstromes I_w über den Speisestrom den Strommodulationsgrad m_I entsprechend zu definieren durch:

$$m_I = \frac{\sqrt{2} \cdot I_w}{I_g} \cdot 100\% \quad (5)$$

In der Arbeit von Jaumann [5] ist das Verhältnis

$$k = \frac{m_L}{m_I} \quad (6)$$

zur Bewertung der Lichtmodulation benutzt worden. Es wird in der vorliegenden Arbeit davon abgesehen, da die Mehrzahl der Messungen mit konstantem m_I durchgeführt worden sind.

Die Frequenz- und Amplitudenabhängigkeit der Lichtmodulation und die erreichbaren Höchstwerte bilden den Hauptteil der Messungen, da durch sie eine technische Verwendbarkeit der modulierten Lichtquelle in erster Linie gegeben ist. Zur Bestimmung der Abhängigkeit des Lichtmodulationsgrades vom Quecksilberdampfdruck dient die Meßlampe. Der Druck wird aus der mit einem Thermoelement gemessenen Temperatur T_2 (Abb. 2) des siedenden Quecksilbers als Sättigungsdruck mit Hilfe der Tafeln von Landolt-Börnstein [20] bestimmt. Der Druckbereich von 1—60 at entspricht einem Temperaturintervall von 357°—736°. Der Lichtmodulationsgrad in verschiedenen Spektralgebieten wird mit Filtern bekannter Durchlässigkeit untersucht:

1. Schottfilter RG 1, 1 mm stark;
2. Zeiß-Filter Monochromat B;
3. Schott-Ultraviolettfilter UG 1 mit GG 2, je 2 mm stark.

Die beiden ersten Filter werden in Verbindung mit einer Cäsium-Vakuumpzelle in einem Glaskolben benutzt, während das dritte Filter mit einer Kalium-Vakuumpzelle in einem Quarzgefäß kombiniert worden ist. Die Durchlaßkurven der Filter mit und ohne Photozelle zeigt Abb. 7; die Werte sind Filtertabellen [21] und Druckschriften über Photozellen [22] entnommen worden. Durch vergrößerte Abbildung des Lichtbogens auf einen verschiebbaren Spalt wird die Verteilung der Lichtmodulation längs der Entladung für zwei feste Frequenzen gemessen, unter besonderer Berücksichtigung der Ansatzpunkte (Brennflecke) des Bogens auf den Elektroden. Zur Messung des Phasenwinkels φ_L zwischen modulierendem Strom und moduliertem Licht wird die Ausgangsspannung des Verstärkers V_3 dem waagerechten und die Spannung U_m des Verstärkers V_1 dem senkrechten

Plattenpaar des Oszillographen zugeführt (Abb. 5b). Um die Phasenabweichung zwischen dem Wechselanteil des Lichtstromes Φ und der Ausgangsspannung U_m zu erhalten, muß bei hohen Frequenzen wiederum der Einfluß der Eingangskapazität berücksichtigt werden.

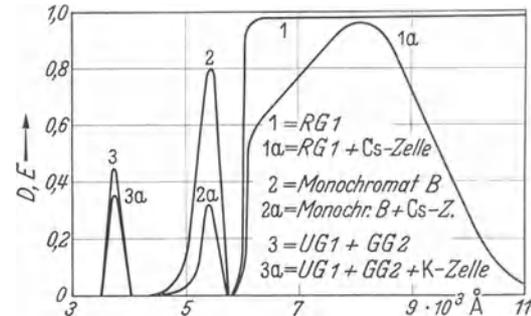


Abb. 7. Durchlässigkeit D von Farbfiltern und relative spektrale Empfindlichkeit E von Filter und Photozelle.

Für die Anwendbarkeit des modulierten Quecksilberdampflichtes in der Elektroakustik sind neben der Frequenzabhängigkeit die durch den Modulationsvorgang bedingten Verzerrungen maßgebend. Sie werden zweckmäßig durch den Klirrfaktor k_L des modulierten Lichtes angegeben [17, 18], der mit der üblichen Wechselstrombrücke gemessen wird.

IV. Meßergebnisse.

a) Im Arbeitspunkt ($I_g = 2,0$ A, $U_g = 125$ V) der Mitteldrucktype HgH 1000 entnimmt man der bei

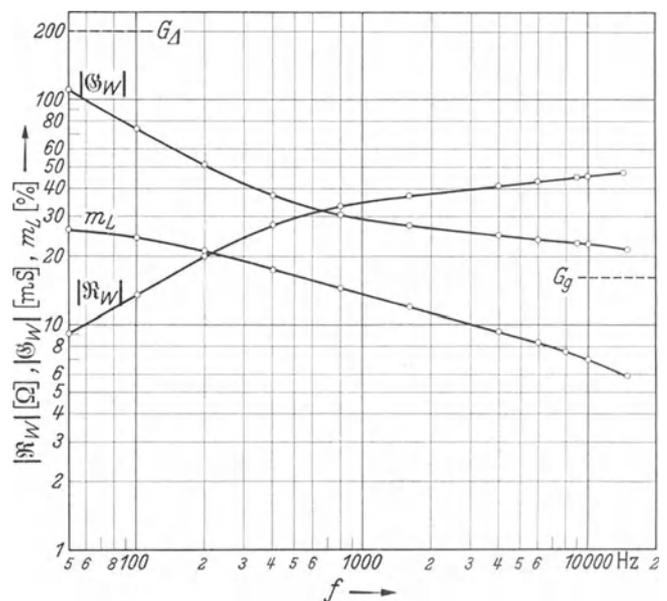


Abb. 8. HgH 1000, Frequenzgang der Wechselstromleitfähigkeit und des Lichtmodulationsgrades.

dem niedrigen Druck von 1 at noch fallenden Stromspannungskennlinie eine Gleichstromleitfähigkeit $G_g = \frac{1}{R_g}$ von 16 mS und eine differentielle Leitfähigkeit $G_A = \frac{1}{R_A}$ von $-0,2$ S. Zur Stabilisierung des Wechselstromkreises muß in diesem Falle ein ohmscher

Dämpfungswiderstand zugeschaltet werden. Dem Betriebsgleichstrom wird ein Wechselstrom $I_w = 0,33$ A zwischen 50 Hz und 15 kHz, entsprechend einem Strommodulationsgrad m_I von 23,6%, überlagert. Dieser Wert ist einerseits gewählt worden, um auf einem genügend linearen Stück der Kennlinie zu arbeiten, andererseits um eine ausreichende Meßspannung zu erhalten. Der Strommodulationsgrad ist bei allen untersuchten Lampen gleich, soweit nicht auf

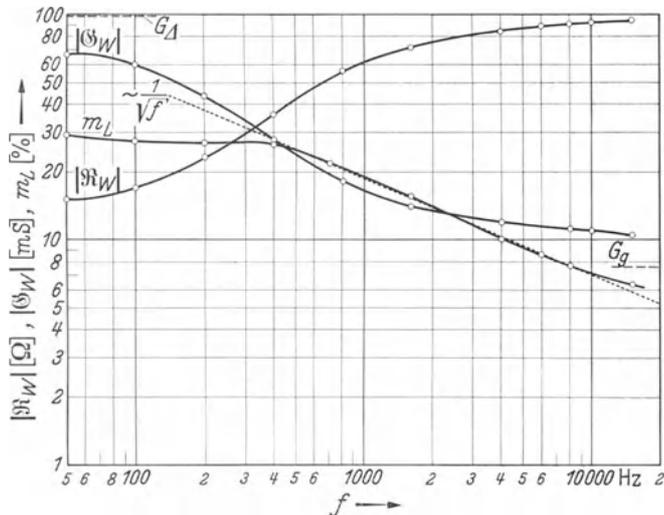


Abb. 9. Hg Q 300, Frequenzgang der Wechselstromleitfähigkeit und des Lichtmodulationsgrades.

andere Werte hingewiesen wird. Der Wechselstromleitwert $|G_w|$ der Hg H 1000 (Abb. 8) nimmt im Bereich zwischen 50 Hz und 400 Hz etwa mit $\frac{1}{\sqrt{f}}$ ab und nähert sich bei sehr tiefen Frequenzen dem Wert G_A , während er bei hohen Frequenzen G_g zustrebt. Der Lichtmodulationsgrad m_L (Abb. 8) nimmt zwischen 200 Hz und 10 kHz etwa logarithmisch ab. Für tiefe Frequenzen ist $m_L > m_I$. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Frequenzverlauf der Wechselstromleitfähigkeit und dem des Lichtmodulationsgrades ist bei dieser Type noch nicht zu erkennen. Steigert man den Strommodulationsgrad bis auf 85% (Abreißgrenze des Bogens), so erzielt man bei 6 kHz eine Lichtdurchsteuerung von nur 25%.

b) Im Arbeitspunkt der Hochdrucklampe Hg Q 300 ($I_g = 0,75$ A, $U_g = 97$ V, $p = 10$ at) findet man $G_A = -0,1$ S, und $G_g = 7,7$ mS. Den Frequenzgang der Wechselstromleitfähigkeit $|G_w|$ und des Lichtmodulationsgrades m_L zeigt Abb. 9. Der Verlauf des letzteren weicht von dem der Type Hg H 1000 (Abb. 8) erheblich ab und ist charakteristisch für alle weiteren Höchstdruckentladungslampen. Im Bereich der tiefen Frequenzen bis etwa 400 Hz ist m_L praktisch konstant und etwas größer als m_I ; dann setzt plötzlich in einem eng begrenzten Bereich

um 500 Hz ein in doppelt logarithmischem Maßstab linearer Abfall bis an die obere Grenze des Frequenzbandes ein. In diesem Gebiet kann der Verlauf des Lichtmodulationsgrades durch folgende empirische Formel angenähert werden:

$$m_{L(\%)} \approx \frac{500}{\sqrt{f(\text{Hz})}} \quad (7)$$

c) Die Meßlampe gestattet eine beliebige Dosierung des Quecksilberdampfdruckes. Da die Lebensdauer des empfindlichen Quarzgefäßes entscheidend vom Druck abhängt, wird dieser Meßparameter auf 20 at festgelegt, um durch eine schwache Belastung die Sicherheit für die Durchführung der geplanten Meßreihen zu haben. Die Stromstärke I_g wird auf 6 A eingestellt, die zugehörige Spannung U_g beträgt 60 V und die Leitfähigkeit G_A 2,2 S. Die Strom-Spannungskennlinie und die Strahlungseigenschaften sind eingehend von Rompe und Thouret [11] mit Hilfe einer gleichartigen Meßlampe untersucht worden. Die Kennlinie ist flach ansteigend, d. h. diese Entladung kann nach beendetem Einbrennvorgang ohne Vorwiderstand an einem Netz entsprechender Spannung betrieben werden. Bei $I_g = 1$ A geht die steigende Kennlinie in eine fallende über, in diesem Bereich ist Schwingungserzeugung nach Abschn. II, a, 2 möglich.

Die Wechselstromleitfähigkeit $|G_w|$ zwischen 50 Hz und 102,4 kHz nimmt mit der Frequenz ab (Abb. 10) und nähert sich an den Enden des Bereiches G_A bzw. G_g . Zur rohen Bestimmung des Phasenwinkels φ_w werden Oszillogramme wie Abb. 21 herangezogen. Man erkennt, daß der Strom I_w der Wechselspannung U_w nacheilt. Der Frequenzverlauf von φ_w (Abb. 10) hat ein Maximum von 43° bei 2500 Hz. Der

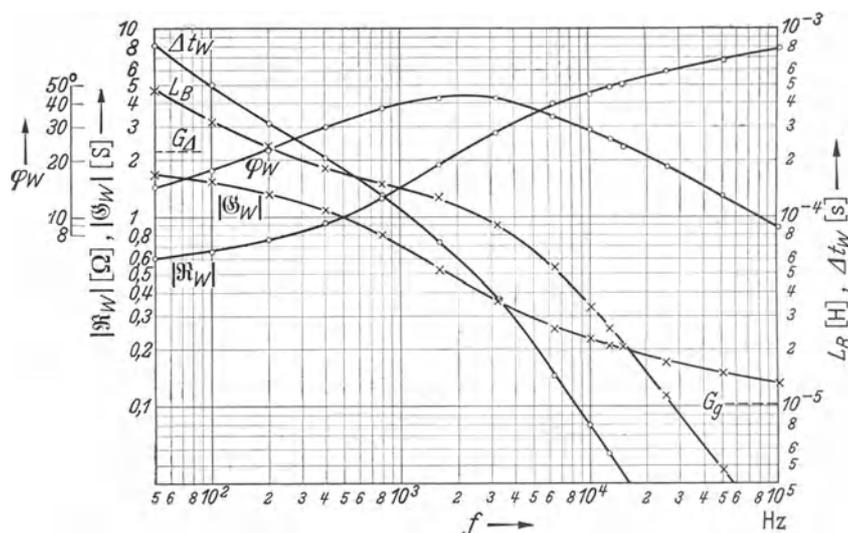


Abb. 10. Meßlampe, Frequenzgang der Wechselstromeigenschaften ($\Delta t_w =$ Zeitdifferenz zwischen Spannungs- und Strommaximum).

Anstieg zwischen 50 Hz und 800 Hz läßt sich darstellen durch

$$\varphi_{w(\varphi)} \approx 3,75 \cdot \sqrt[3]{f(\text{Hz})} \quad (8)$$

Der Abfall zwischen 10 kHz und 100 kHz wird durch

$$\varphi_{w(\varphi)} \approx \frac{1}{3,85 \cdot \sqrt{f(\text{Hz})}} \quad (9)$$

angenähert. Der Wechselstromwiderstand R_w läßt sich bei Kenntnis der Größe und des Vorzeichens des Phasenwinkels φ_w rein formal in eine Wirkkomponente R_w und eine Blindkomponente L_w (wegen des nacheilenden Stromes) aufspalten. Die Blindkomponente nimmt nach Abb. 10 von etwa 500 μ H auf 2 μ H ab. Die Amplitudenabhängigkeit des Wechselstromwiderstandes wird bei 50 Hz, 800 Hz, 10 kHz und 102,4 kHz mit Stromdurchsteuerungen bis 90% untersucht. Sie bleibt in jedem Falle innerhalb der Meßgenauigkeit von etwa 3% konstant. Bei 50 Hz ist die Modulationsstromstärke durch die Gefahr des Abreißen des Bogens begrenzt, bei 10 kHz und 102,4 kHz durch die Leistung der Wechselstromquellen.

Zur Messung des Lichtmodulationsgrades m_L ist anfänglich der gesamte von der Entladung emittierte Lichtstrom von der Photozelle erfaßt worden. Nach späteren Untersuchungen über die spektrale Abhängigkeit (Abb. 13) und die örtliche Verteilung der Lichtmodulation (Abb. 14) zeigt es sich, daß die einzelnen Teile des Quecksilberlichtbogens hinsichtlich der Lichtmodulation verschieden zu bewerten sind. Die Frequenzabhängigkeit von m_L zwischen 50 Hz und 102,4 kHz ist daher an dem Bogen mit und ohne Elektrodenlicht, mit und ohne Brennflecke, am Kathoden- und Anodenbrennfleck und am Mittelteil untersucht worden. Insbesondere fälscht das Elektrodenlicht die absolute Höhe des Lichtmodulationsgrades, da es unmoduliert bleibt, verhältnismäßig intensiv ist und in den Bereich maximaler spektraler Photozellenempfindlichkeit (Cäsium) fällt. Aus Abb. 11 erkennt man, daß der Frequenzverlauf allgemein

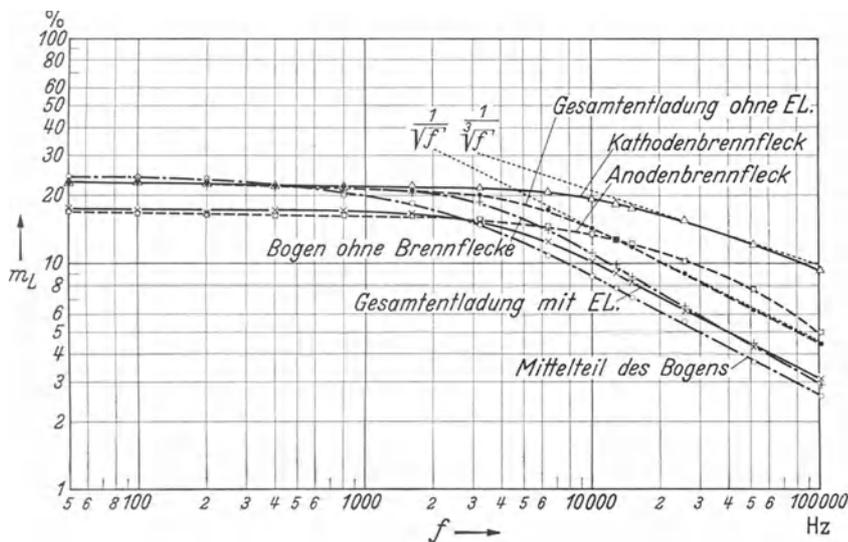


Abb. 11. Meßlampe, Frequenzgang des Lichtmodulationsgrades (EL. = Elektrodenlicht).

charakterisiert ist durch ein horizontales Stück von 50 Hz bis 2000 Hz, an das sich ein mehr oder weniger steiler Abfall nach höheren Frequenzen anschließt. Die Abnahme des Lichtmodulationsgrades der gesamten Entladung ohne Elektrodenlicht läßt sich im Frequenzband von 10 kHz bis 102,4 kHz darstellen

durch:
$$m_{L(\%)} \approx 1600 \cdot \frac{1}{\sqrt{f(\text{Hz})}}. \quad (10)$$

Der Kathodenbrennfleck zeichnet sich durch einen sehr langsamen Abfall der Lichtmodulation aus, der

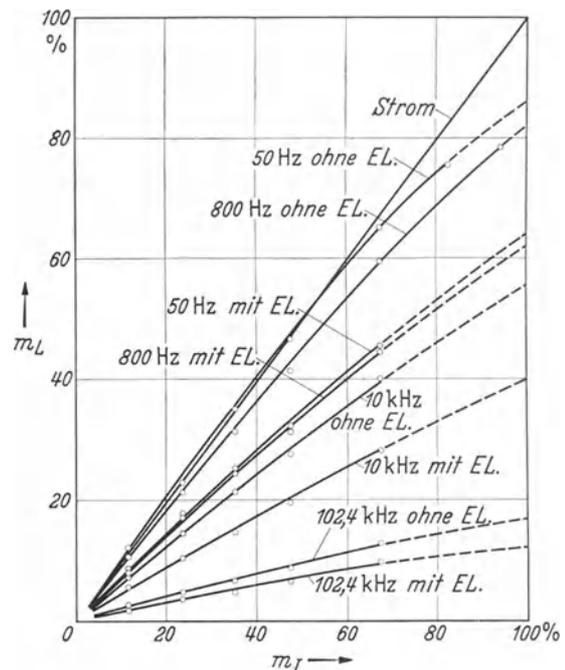


Abb. 12. Meßlampe, Amplitudenkennlinie der Lichtmodulation bei vier Frequenzen (EL. = Elektrodenlicht).

erst oberhalb 10 kHz einsetzt. Die Frequenzkurve des Mittelteiles der Entladung weist den ausgesprochen horizontalen Verlauf am Anfang des Frequenzbereiches nicht auf, damit nähert sich diese Kurve derjenigen der Lampe Hg H 1000 (Abb. 8), die eine besonders lange Bogensäule hat. Die Amplitudenkennlinie der Lichtmodulation und die maximal erreichbaren Modulationsgrade sind für 50 Hz, 800 Hz, 10 kHz und 102,4 kHz mit und ohne Elektrodenlicht gemessen worden. Abb. 12 zeigt, daß durch das unmodulierte Elektrodenlicht eine Verminderung der Lichtmodulation um etwa 25% im gesamten Frequenzband eintritt. Für 50 Hz folgt die Lichtmodulation bis zu einer Durchsteuerung von 50% praktisch der Strommodulation; auch bei 800 Hz ist die Abweichung gering. Für höhere Frequenzen nimmt m_L schnell ab, so daß bei 102,4 kHz selbst für eine (extrapolierte) 100proz.

Stromdurchsteuerung nur ein Lichtmodulationsgrad von etwa 12% zu erwarten ist. Die Lichtmodulationskurven verlaufen bis zu 70proz. Strommodulation fast geradlinig, daher sind auch die nichtlinearen Verzerrungen des modulierten Lichtes gering, wie subjektiv und objektiv durch Klirrfaktormessungen fest-

gestellt worden ist. Die Druckabhängigkeit der Lichtmodulation wird in einem Bereich von 5 bis 60 at untersucht. Dabei nimmt m_L mit steigendem Druck ab, und zwar ist der prozentuale Abfall bei hohen Frequenzen größer als bei tiefen. Eine Kontrollmessung

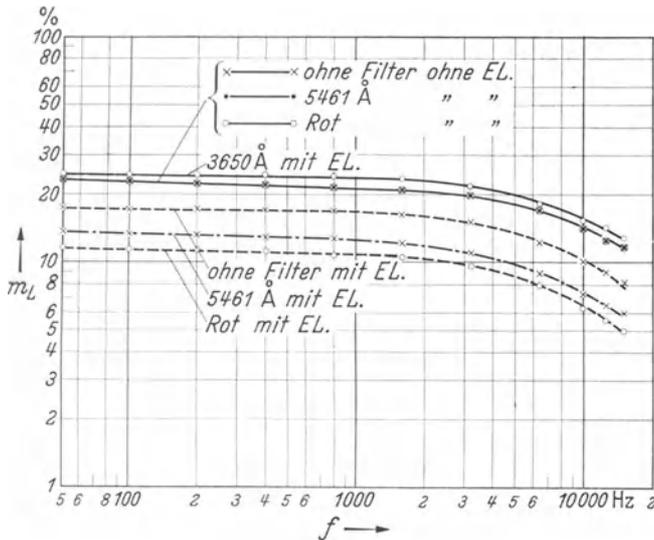


Abb. 13. Meßlampe, spektrale Verteilung der Lichtmodulation (EL. = Elektrodenlicht).

mit einer zweiten Lampe konnte nicht durchgeführt werden, da das Gefäß bei 60 at während der Messung geplatzt ist. Die spektrale Abhängigkeit der Lichtmodulation wird in den Linien 3650/63 Å, 5461 Å und im Ultraroten, wo die Linien 10139 Å und 11287 Å

der Lichtmodulation von der Farbe des Lichtes anzunehmen (Abb. 13). Jedoch zeigen die späteren Messungen ohne Elektrodenlicht, daß dies nicht der Fall ist. Vielmehr ist die scheinbare Abhängigkeit auf den unmodulierten Anteil des Lichtes der hellgelb glühenden Wolframelektroden zurückzuführen, der naturgemäß nach der langwelligen Seite des Spektrums immer stärker in Erscheinung tritt. Die systematische Untersuchung der örtlichen Verteilung der Lichtmodulation längs der Entladung ist durch die oben beschriebenen Messungen an einzelnen Punkten des Bogens und das anfangs ungeklärte Verhalten in den verschiedenen Spektralbereichen veranlaßt worden. Abb. 14 zeigt, daß bei 50 Hz der Modulationsgrad über die ganze Entladung praktisch konstant ist. Bemerkenswert ist die Einsenkung nach dem Kathodenbrennfleck, die wahrscheinlich auf die geringe Feldstärke, die nach dem Kathodenfall im Entladungsbogen herrscht, zurückzuführen ist. Im Anodenbrennfleck liegt ein zweites Maximum mit langsamerem Anstieg, entsprechend dem Feldstärkeverlauf. Bei 10 kHz dagegen bleiben nur die Maxima in den Brennflecken unverändert, während die Lichtmodulation in der Mitte des Bogens fast auf 25% der bei 50 Hz erreichten sinkt. Nach höheren Frequenzen beteiligt sich also die leuchtende Gassäule immer weniger an der Lichtmodulation.

Einen Einblick in den zeitlichen Ablauf des Modulationsvorganges vermittelt die Kenntnis des Phasenwinkels φ_L zwischen dem Modulationsstrom \mathfrak{S}_w und

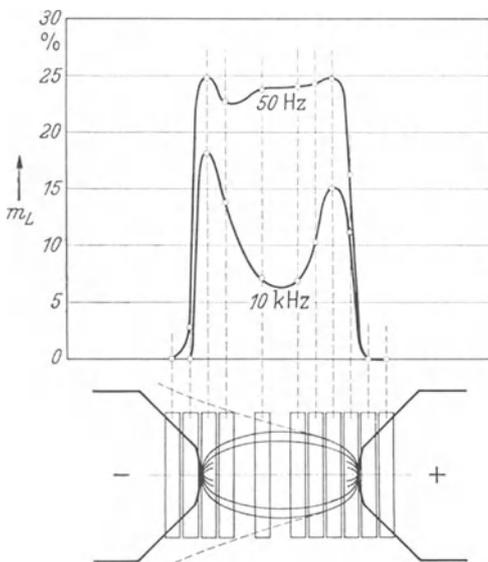


Abb. 14. Meßlampe, örtliche Verteilung der Lichtmodulation im Bogen.

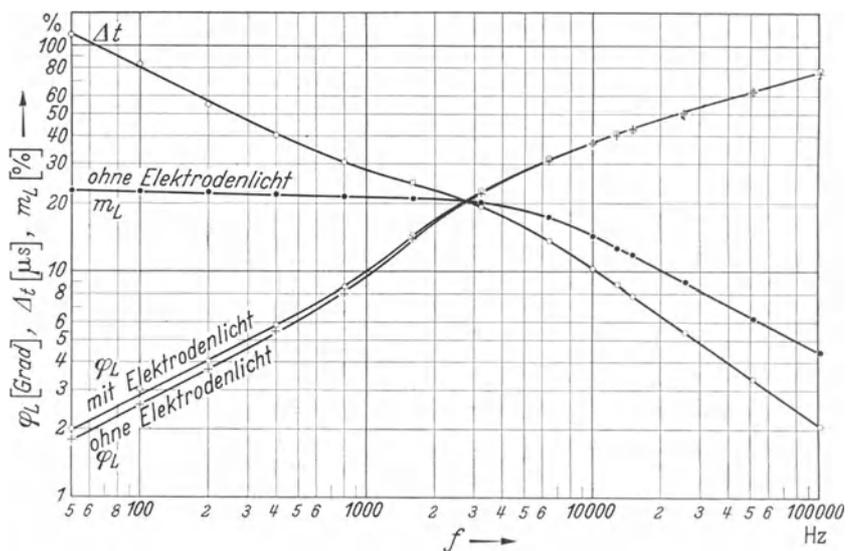


Abb. 15. Meßlampe, Frequenzgang des Phasenwinkels der Lichtmodulation und der Zeitdifferenz Δt zwischen Wechselstrom und moduliertem Licht.

hervortreten, zwischen 50 Hz und 15 kHz gemessen. Das Spektrum einer Quecksilberhochdruckentladung unter einem Druck von 20 at zeigt noch deutlich das von der Niederdruckentladung bekannte Linienspektrum, allerdings sind die Linien verbreitert und nach Uyterhoeven [9] von einem schwachen Kontinuum begleitet. Auf Grund der zuerst mit Elektrodenlicht ausgeführten Messungen ist eine Abhängigkeit

dem modulierten Licht. Zur Vorzeichenbestimmung dienen die Oszillogramme (Abb. 23 und 24), während die Größe von φ_L aus den Lissajousfiguren (Abb. 22) bestimmt wird. Zwischen 50 Hz und 800 Hz wird der Frequenzverlauf des Phasenwinkels (Abb. 15) durch die Beziehung

$$\varphi_{L(\varphi)} \approx \frac{\sqrt{f(\text{Hz})}}{4,29} \quad (11)$$

angenähert. In die gleiche Abb. 15 ist ferner der Bruchteil der Periodendauer, der dem jeweiligen Phasenwinkel entspricht, und die daraus folgende Zeitdifferenz Δt zwischen dem Strom- und dem Lichtmaximum eingetragen. Die Kurve zeigt anfangs eine Abnahme mit der Frequenz von der Form

$$\Delta t_{(\mu s)} \approx \frac{690}{\sqrt{f_{(Hz)}}} \quad (12)$$

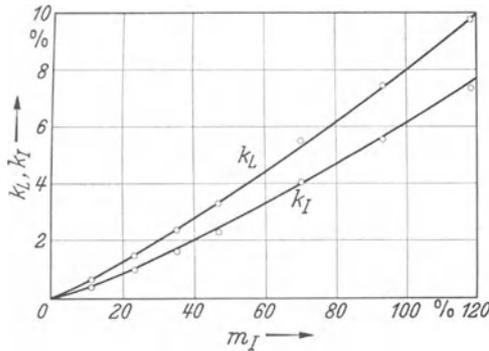


Abb. 16. Meßlampe, Klirrfaktor, abhängig von der Stromdurchsteuerung.

Aus dem Wert Δt entnimmt man, daß die für die Lichtmodulation maßgebenden Ionisierungsvorgänge noch innerhalb von $2 \mu s$ ablaufen müssen.

Der Klirrfaktor k_L des modulierten Lichtes wird mit 800 Hz für Strommodulationsgrade m_I von 11,8% bis 118% bestimmt. In Abb. 16 ist neben k_L der Klirrfaktor k_I des Modulationsstromes eingetragen worden, denn es zeigt sich, daß bei Belastung der Wechselstromquelle mit dem während einer Periode nicht konstanten Widerstand der Entladung eine erhebliche Verzerrung des Modulationsstromes eintritt,

die nach Ersetzen der Entladungsstrecke durch einen ohmschen Widerstand gleicher Größe verschwindet. Zur absoluten Höhe des Klirrfaktors ist zu bemerken, daß nach den Erfahrungen der Elektroakustik ein Klirrfaktor von 5% zulässig ist, entsprechend einer 70proz. Durchsteuerung des Speisestromes I_g .

d) Die 200 W-Kugellampe ist nach den gleichen Gesichtspunkten wie die Meßlampe untersucht worden, abgesehen von der Druckabhängigkeit und der spektralen Verteilung der Lichtmodulation. Bei einem Betriebsgleichstrom von 6 A ergibt sich wegen des kleinen Elektrodenabstandes eine Gleichspannung von etwa 30 V. Der Dampfdruck beträgt rund 50 at. Im Arbeitspunkt erhält man eine differentielle Leitfähigkeit von $-20 S$ infolge der sehr schwach geneigten Kennlinie.

Die Wechselstromleitfähigkeit $|\mathcal{G}_w|$ nimmt fast im gesamten Frequenzbereich mit $\frac{1}{\sqrt{f}}$ ab (Abb. 17). Zwischen 100 Hz und 1600 Hz gilt:

$$|\mathcal{G}_w|_{(S)} \approx 120 \frac{1}{\sqrt{f_{(Hz)}}} \quad (13)$$

An den Enden des Frequenzbandes strebt $|\mathcal{G}_w|$ den Werten G_Δ und G_g zu. Der Phasenwinkel φ_w (Abb. 17) weist für tiefe Frequenzen Werte von $\varphi_w > 90^\circ$ als Folge der fallenden Gleichstromkennlinie auf. Bei 180 Hz zeigt $\varphi_w = 90^\circ$, daß von dort an die Kennlinie für Wechselströme höherer Frequenz im Mittel wieder ansteigt. Ein ähnlicher Verlauf des Phasenwinkels ist auch von Elenbaas [7] gefunden worden. Im Anfangsbereich kann die Frequenzabhängigkeit durch folgende

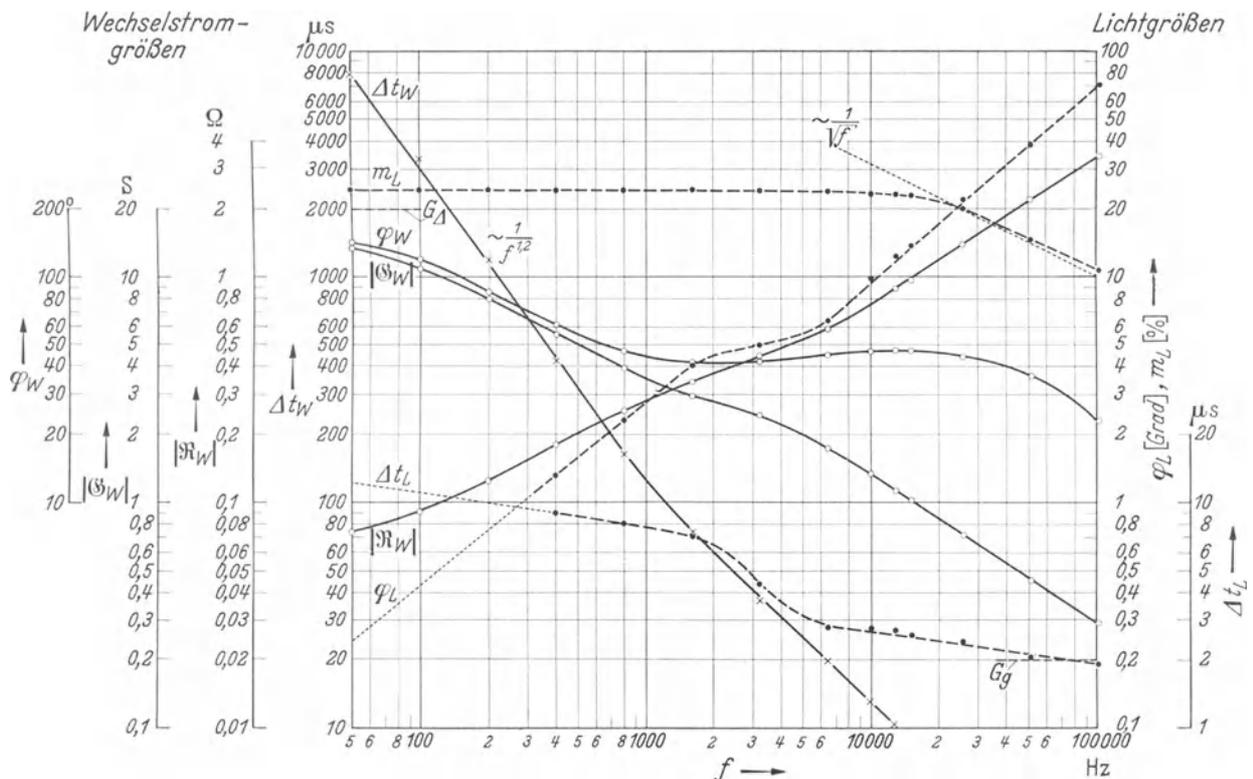


Abb. 17. Kugellampe, Frequenzgang der Wechselstromeigenschaften und der Lichtmodulation (Δt_w = Zeitdifferenz zwischen Spannungs- und Strommaximum, Δt_L = Zeitdifferenz zwischen Wechselstrom und moduliertem Licht).

Beziehung wiedergegeben werden:

$$\varphi_{w(\varphi)} = 1230 \frac{1}{\sqrt{f(\text{Hz})}}. \quad (14)$$

Die Amplitudenkennlinie des Wechselstromwiderstandes ist bei 50 Hz, 800 Hz, 10 kHz und 102,4 kHz untersucht worden. Es zeigt sich, daß der Wechselstromwiderstand für jede der drei höheren Frequenzen praktisch konstant bleibt, während bei 50 Hz oberhalb einer Stromdurchsteuerung von 50% eine starke Zunahme eintritt. Die Momentanerzeugung von Ladungsträgern nimmt nicht mehr proportional der Stromdichte zu.

Zur Messung der Lichtmodulation wird nur die Strahlung der Säule einschließlich der Brennflecke herangezogen. Der Frequenzgang der Lichtmodulation (Abb. 17) zeigt, daß zwei Gebiete hervortreten,

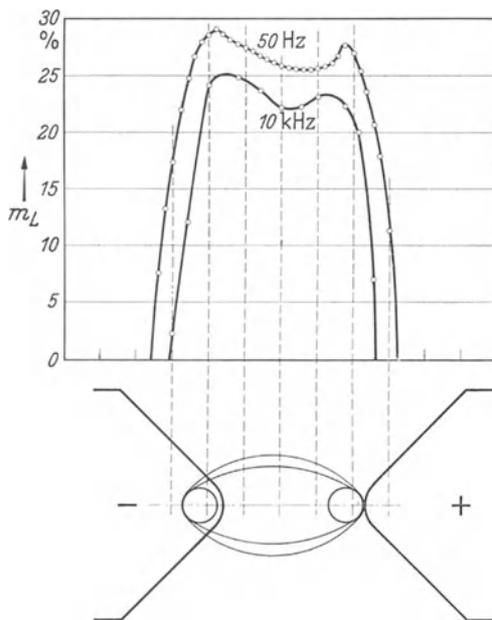


Abb. 18. Kugellampe, örtliche Verteilung der Lichtmodulation im Bogen.

die noch schärfer als bei den bisher untersuchten Lampen gegeneinander abgegrenzt sind:

1. zwischen 50 Hz und 10 kHz bleibt der Lichtmodulationsgrad m_L konstant und entspricht dem Wert des Strommodulationsgrades m_I ;

2. nach einem kurzen Übergangsbereich setzt von 25 kHz bis zum Ende des Frequenzbandes ein gleichmäßiger Abfall ein, der durch folgende Gleichung beschrieben wird:

$$m_L(\%) \approx 1950 \frac{1}{\sqrt{f(\text{Hz})}}. \quad (15)$$

Die Amplitudenkennlinie der Lichtmodulation wird für 50 Hz, 800 Hz, 10 kHz und 102,4 kHz aufgenommen. Bis 800 Hz folgt die Lichtmodulation der Strommodulation weitgehend, größere Abweichungen ergeben sich bei 10 kHz, und bei 102,4 kHz ist nur noch mit dem Verhältnis $m_I : m_L = 3 : 1$ zu rechnen. Die maximal erreichbaren Werte von m_L betragen bei voller Stromdurchsteuerung etwa 35% bei 102,4 kHz, 80% bei 10 kHz und 90% für 800 Hz und 50 Hz. Die

örtliche Verteilung der Lichtmodulation längs der Entladung zeigt Abb. 18. Da der Bogen der Kugellampe nur den vierten Teil der Bogenlänge der Meßlampe aufweist, ist ein Vergleich mit der letzteren besonders aufschlußreich. Aus Abb. 18 geht hervor, daß der Kathodenansatzpunkt des Bogens etwas hinter der Elektroden spitze liegt, wodurch eine Modulation des Elektrodenlichtes vorgetäuscht wird. Die Lichtmodulation ist in und unmittelbar neben den Brennflecken am größten, und die Einsattelung der Kurve für 10 kHz in der Bogenmitte ist eben erst angedeutet im Gegensatz zur Meßlampe. Auch ist der Unterschied im Modulationsgrad zwischen 50 Hz und 10 kHz nur gering. Eine Messung mit 102,4 kHz konnte nicht durchgeführt werden, da der Bogen so unruhig brennt, daß durch starke Schwankungen des vom Spalt ausgeblendeten Lichtstromes genaue Ablesungen der Ausgangsspannung des Verstärkers V_3 unmöglich sind. Für die Konstruktion von Lampen mit großer Lichtmodulation für Frequenzen oberhalb 10 kHz ist die Einhaltung eines kleinen Elektrodenabstandes äußerst wichtig.

Der Phasenwinkel φ_L zwischen modulierendem Strom und moduliertem Licht (Abb. 17) bleibt unterhalb 200 Hz unter 1° , dann folgt ein annähernd logarithmischer Anstieg bis an die Grenze des Frequenzbandes.

Der Klirrfaktor k_L des modulierten Lichtes wird mit 800 Hz für Stromdurchsteuerungen bis 94,3% gemessen. Er ist, wie bei der Meßlampe, im wesentlichen durch die Verzerrungen des Modulationsstromes bedingt, und zwar liegt er im ganzen niedriger. Die absolute Höhe des Klirrfaktors läßt eine fast völlige Durchmodulation des Speisestromes zu, ohne daß für elektroakustische Zwecke untragbare Verzerrungen entstehen.

e) Die Untersuchungen an der Doppellampe (Abb. 3) erstrecken sich hauptsächlich auf die Durchsteuerbarkeit des Speisestromes der einen Entladungsstrecke, während der Gleichstrom in der anderen konstant bleibt. Bei der Aufnahme der Strom-Spannungskennlinien ergibt sich, daß die Spannungsverteilung längs der beiden Entladungen symmetrisch ist. Diese Symmetrie wird immer erzwungen, auch wenn dadurch zwischen den Bögen ein Stromübergang stattfindet. Um die gegenseitige Beeinflussung möglichst gering zu halten, ist es zweckmäßig, durch geeignete Widerstände von vornherein für eine symmetrische Spannungsverteilung zu sorgen.

Die Frequenzabhängigkeit der Lichtmodulation entspricht der der Meßlampe. Geht man zu höheren Stromdurchsteuerungen als 23,6% über, so erreicht man Werte von $m_I = 85\%$ ohne Veränderung des Bogens. Bei noch größerer Strommodulation springt die Entladung A_2K_2 nach A_2K_1 über, weil die Kathode K_2 von einem bestimmten Zeitpunkt der Wechselstromperiode an nicht mehr genügend Elektronen emittiert, die zur Aufrechterhaltung der Entladung notwendig sind. Ein völliges Verlöschen des Bogens tritt nicht ein. Die Rückzündung der Entladung A_2K_1 findet

jedoch auch bei abgeschaltetem Modulationsstrom nicht wieder statt.

Der symmetrische Aufbau der Doppellampe legt die Modulation beider Entladungen nahe. Eine in den zwei Bögen gleichsinnige Stromvariation bedeutet gegenüber der einfachen Säule keinen grundsätzlichen Unterschied. Dagegen ist es bei einer Phasendifferenz von 180° zwischen den modulierten Lichtströmen

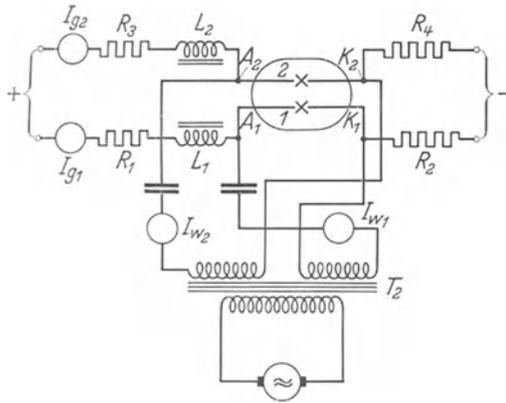


Abb. 19. Doppellampe, Gegentaktmodulation.

prinzipiell möglich, bei völliger Symmetrie der Anordnung in der Summe der Lichtströme keine Modulation mehr nachzuweisen. Diese Gegentaktmodulation ist nach der Schaltung in Abb. 19 durchgeführt worden. Man erhält eine Abnahme des Lichtmodulationsgrades auf 1/10 bis 1/20 des ursprünglichen Wertes. Will man die Lichtmodulation voll ausnutzen, so ist eine optische Trennung der Lichtströme auf der Senderseite durch Blenden und Prismen und ihre Zusammensetzung auf

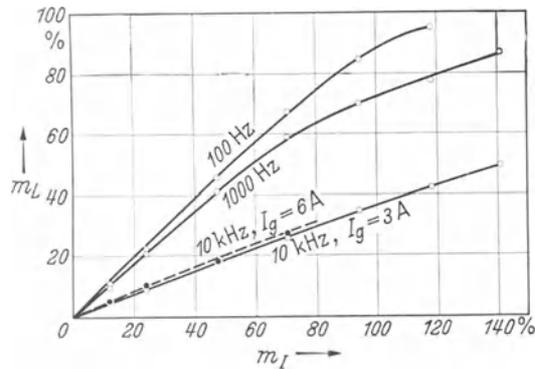


Abb. 20. Lampe mit Hilfsentladung, Amplitudenkennlinie der Lichtmodulation.

der Empfängerseite in zwei im Gegentakt geschalteten Photozellen notwendig. Diese Anordnung zeichnet sich durch geringe Verzerrungen der Lichtmodulation und durch eine zulässige Stromdurchsteuerung bis 95% aus, ehe eine Instabilität auftritt.

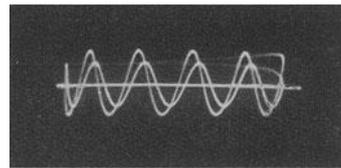
f) Die Messungen an der Lampe mit Hilfsentladung sind ausschließlich unter dem Gesichtspunkt der Stromdurchsteuerung, der erreichbaren Lichtmodulation und der Stabilität vorgenommen worden. Dem Speisestrom von 6 A der Hauptentladung werden Modulationsströme bis 6 A überlagert. Den Lichtmodulationsgrad m_L mißt man bei sehr hohen Strom-

durchsteuerungen wegen der Unsymmetrie der Lichtstromkurve unmittelbar mit Photozelle und Braunschwerer Röhre, indem die am Photowiderstand entstehende Spannung U_p an das senkrechte Plattenpaar gelegt wird (Abb. 5b). Die Kurven in Abb. 20 zeigen, daß auch mit Stromdurchsteuerungen $m_I > 100\%$ keine völlige Lichtmodulation ($m_L = 100\%$) erreichbar ist. Bis zu 90proz. Strommodulation bleiben die auf dem Oszillographen geschriebenen Lichtstromkurven gut sinusförmig; später gehen sie in solche mit stark abgeflachten negativen Halbwellen über, d. h. die Lichtemission sinkt nicht unter einen Minimalwert herab. Die Stabilität der Entladung ist ausreichend. Falls ein Verlöschen bei 50 oder 100 Hz doch eintritt, zündet der Bogen sofort wieder. Die Hilfsentladung erfüllt die an sie gestellten Anforderungen vollständig.

V. Deutung der Meßergebnisse.

a) Im stationären Zustand wird der Stromtransport in der Entladung durch folgende, allgemein bekannte Beziehung dargestellt [11]:

$$\frac{I}{\pi r^2} = n_e \cdot b_e \cdot e \cdot |\mathcal{E}|. \quad (16)$$



← t

Abb. 21. Phasenlage zwischen Strom (große Amplitude) und Spannung (kleine Amplitude) ohne Gleichstromwerte bei 800 Hz.

Dabei bedeuten I die Stromstärke, $2r$ den Durchmesser der Entladungsbahn, n_e die Elektronenkonzentration, b_e die Elektronenbeweglichkeit, $|\mathcal{E}|$ die Feldstärke und e die Elementarladung des Elektrons. In erster Näherung ist der Gradient $|\mathcal{E}|$ fast stromunabhängig, genauere Untersuchungen von Rompe und Thouret [25] ergeben jedoch, daß

$$|\mathcal{E}| \sim I^{2\Theta_A - \Theta_i} \quad (17)$$

ist, wobei Θ_A die mittlere Anregungsspannung und Θ_i die Ionisierungsspannung darstellen. Für Quecksilber ist $\Theta_A \approx 8$ V und $\Theta_i = 10,5$ V, so daß

$$|\mathcal{E}| \sim I^{0,20} = \sqrt[5]{I} \quad (18)$$

und die Leistung N/cm der Bogenlänge

$$N/cm \sim I^{1,2} \quad (19)$$

werden.

b) Berechnet man aus Gl. (16) den Wechselstromwiderstand $|\mathfrak{R}_w|$ durch Differenzieren nach I , so erhält man:

$$|\mathfrak{R}_w| = \frac{d|\mathcal{E}|}{dI} = \frac{1}{\pi^2 \cdot r^2 \cdot n_e \cdot b_e \cdot e} - \frac{|\mathcal{E}|}{n_e} \cdot \frac{dn_e}{dI}. \quad (20)$$

Der erste Anteil stellt den Gleichstromwiderstand R_g dar, während der zweite das Verhalten bei Änderungen von I kennzeichnet. Für tiefe Frequenzen ist die Elek-

tronenkonzentration n_e proportional der Stromstärke I , also $\frac{dn_e}{dI} > 0$ und konstant, und der Betrag von \Re_w wird gegenüber R_g erheblich vermindert (Abb. 8...10). Bei hohen Frequenzen folgt die Elektronenneubildung den Stromschwankungen nicht mehr, $\frac{dn_e}{dI} = 0$, d. h. $|\Re_w|$ nähert sich R_g . Das zwischen diesen Extremen liegende Übergangsgebiet ist in Abb. 9 und 10 deutlich ausgeprägt. Die aus dem Phasenwinkel φ_w als Bruchteil einer Periode der jeweils benutzten Meßfrequenz berechnete Zeitdifferenz Δt_w zwischen dem Spannungs- und dem Strommaximum nimmt, wie Abb. 10 und 17 zeigen, mit der Frequenz ab, so daß Werte von weniger als $1 \mu\text{s}$ bei aufgedrückten Stromschwankungen von 100 kHz erreicht werden. Der Phasenwinkel φ_w nähert sich bei hohen Frequenzen oberhalb 100 kHz

Frequenzen eine um etwa 20% höhere Lichtmodulation fest, als der Stromdurchsteuerung entsprechen würde (Abb. 8 und 9). Aus den Abb. 8, 9, 11 und 17 geht weiter hervor, daß mit zunehmender Länge der leuchtenden Gassäule ein immer früher einsetzender Abfall der Lichtmodulation nach hohen Frequenzen eintritt, da die wachsenden Gasvolumina gegenüber Temperaturänderungen immer träger werden. In den meisten Fällen erfolgt die Abnahme mit der Quadratwurzel aus der Frequenz. Den gleichen Frequenzverlauf des abfallenden Teiles und das vorangehende horizontale Stück der Kurve findet auch Jaumann [5], am ausgeprägtesten im Krater des Goerz-Beckbogens. Er nimmt an, daß die von der Wechselstromüberlagerung erzeugte Wärme an der Krateroberfläche frei wird und zum Teil als Wärmeleitungswelle in die Kohle

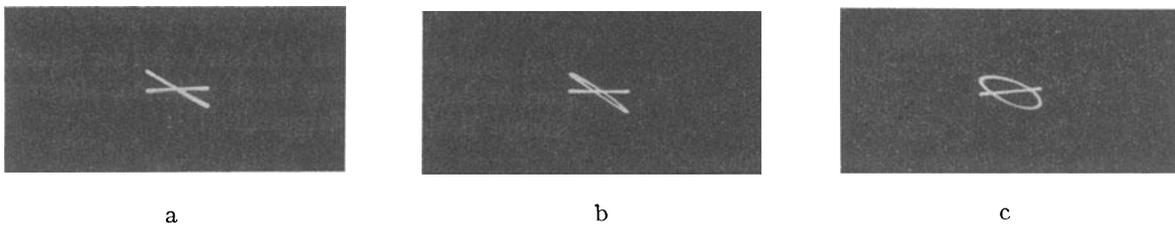


Abb. 22. Phasenmessung zwischen Modulationsstrom und Photostrom a) 200 Hz, b) 800 Hz, c) 10 kHz.

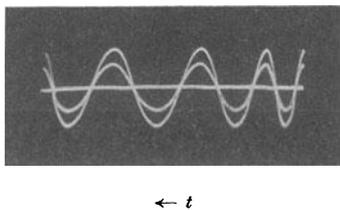


Abb. 23. Phasenlage zwischen Modulationsstrom (große Amplitude) und Photostrom (kleine Amplitude) bei 50 Hz.

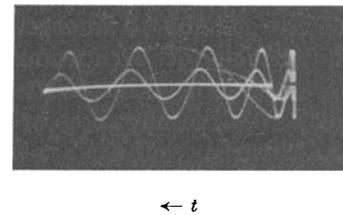


Abb. 24. Phasenlage zwischen Modulationsstrom (große Amplitude) und Photostrom (kleine Amplitude) bei 10 kHz.

dem Wert Null, eine Beobachtung, die auch von Elenbaas [7] bestätigt wird. Die Entladung ist für diese Frequenzen als ein ohmscher Widerstand aufzufassen, dessen Leitfähigkeit mit der durch die Gleichstromentladung gegebenen übereinstimmt.

c) Für die Strahlung, die in einer Linie von den angeregten Quecksilberatomen unter hohem Druck emittiert wird, kann man folgendes Gesetz annehmen [25]:

$$J_\nu = n \cdot h \cdot \nu \cdot A \cdot e^{-\frac{\theta_\nu}{T}}. \quad (21)$$

Darin bedeuten n die Atomkonzentration, A die wirksame Übergangswahrscheinlichkeit, θ_ν die Anregungsspannung des oberen Terms der Linie und T die Entladungstemperatur. Schwankungen von J_ν können nur durch Temperaturänderungen in der Entladung hervorgerufen werden. Da die Temperatur innerhalb kleiner Änderungen linear von der zugeführten Leistung abhängt, muß die Lichtmodulation mit einer Leistungsmodulation identisch sein. Es folgt aus Gl. (19), daß

$$\frac{dN}{N} \sim 1,2 \frac{dI}{I} \quad (22)$$

ist. In der Tat stellt man sowohl bei der Lampe Hg H 1000 als auch bei der Lampe Hg Q 300 bei tiefen

eindringt und zum Teil abgestrahlt wird. Dabei ergibt sich, daß der abgeführte Wärmestrom mit der Wurzel aus der Frequenz steigt, so daß die Temperaturschwankung an der Krateroberfläche in demselben Maße abnimmt, wodurch die gleiche Frequenzabhängigkeit der Lichtmodulation bedingt ist. Bei der Meßlampe und der 200 W-Kugellampe ist der Frequenzgang aus der Temperaturträchtigkeit nicht allein zu erklären, da der Übergang vom frequenzunabhängigen in das frequenzabhängige Gebiet der Lichtmodulation sehr rasch erfolgt. Die örtliche Verteilung der Lichtmodulation zeigt in den Abb. 14 und 18, daß an den Stellen höchster Leuchtdichte (identisch mit den Stellen höchster Stromdichte) sowohl die höchsten Absolutbeträge der Lichtmodulation als auch die weitestgehende Frequenzunabhängigkeit erhalten werden. In den Brennflecken herrscht die höchste Temperatur in der Entladung, also ist dort die Gasdichte am kleinsten. Die Energiekonzentration ist dort ebenfalls am höchsten wegen des Stromdichtemaximums. Für eine Temperatur- und damit Strahlungsvariation bei schwankender Energiedichte sind hier die günstigsten Voraussetzungen gegeben, denn die großen Energieschwankungen je Volumenelement

bewirken die höchsten, praktisch trägheitslosen Temperaturschwankungen wegen der geringen Wärmekapazität je Volumeneinheit. Auch Simon [3] findet die größte Lichtmodulation im Krater des Reinkohlebogens, während Jaumann [5] bei Reinkohle- und Beckbogen eine höhere Lichtmodulation im eigentlichen Bogenteil feststellt.

Die mit der Frequenz zunehmende Phasendifferenz zwischen dem modulierenden Strom und dem modulierten Licht wird durch die wegen der Wärmeträgheit nachhinkenden Temperaturschwankungen des Gasvolumens verursacht. Die Zeit Δt zwischen Strom- und Lichtmaximum, die aus dem Phasenwinkel φ_L und der Periodendauer der jeweiligen Meßfrequenz berechnet wird, nimmt im untersuchten Frequenzband bei der Meßlampe von 100 μs auf 2 μs ab, während die 200 W-Lampe nur Verzögerungen von 10 μs bis 2 μs aufweist. Duddell [2] findet beim Kohlebogen für eine Frequenz von 4300 Hz und 3proz. Strommodulation den Wert $\Delta t < 100 \mu\text{s}$ (unterste Grenze seiner Zeitmeßvorrichtung), bei der Quecksilberentladung (Meßlampe) beträgt er etwa 15 μs . Elenbaas [7] erhält in einer Quecksilberdampfentladung von 20 mm Länge und 5 at Druck bei 50 Hz eine Phasendifferenz von 10° zwischen Strom- und Lichtmodulation. Dieser Winkel entspricht einer Zeit von 550 μs , während sich bei der Meßlampe nur 110 μs ergeben. Der Unterschied ist auf die viermal kleinere Länge des Bogens der Meßlampe zurückzuführen. Von Engl und Steenbeck [24] haben an Kohlebogen mit reiner Wechselstromspeisung von 50 Hz eine Phasendifferenz von 18° zwischen Strom und Licht gemessen, entsprechend einer Zeit von 1 ms.

Zusammenfassung.

1. Die Amplitudenmodulation des Lichtes von Quecksilberhochdrucklampen mit Dampfdrucken von 1 bis 60 at wird im Frequenzbereich von 50 Hz bis 100 kHz untersucht.

2. Die Lichtmodulation wird durch eine Amplitudenmodulation des Speisestromes erzeugt. Es werden dazu Scheinleistungen bis 100 VA benötigt.

3. Die Wechselstromeigenschaften der Entladungsstrecke sind maßgebend für die Anpassung an den Generator. Die Wechselstromleitfähigkeit fällt annähernd mit der Quadratwurzel aus der Frequenz und die Einstellzeit zwischen dem Spannungs- und dem Strommaximum etwa linear mit der Frequenz. Die Entladung verhält sich bei tiefen Frequenzen wie ein verlustbehafteter induktiver Widerstand, während sie bei sehr hohen Frequenzen ($> 10^5$ Hz) ohmschen Charakter annimmt.

4. Der Lichtmodulationsgrad hat folgenden typischen Verlauf: er ist von 50 Hz aufwärts konstant bis zu einer Frequenz, deren Lage in der Frequenzskala

mit wachsender Bogenlänge und abnehmender Leuchtdichte der Entladung herunterrückt. Bis zu diesem Punkt ist die Lichtmodulation mit der Strommodulation identisch. Dann folgt eine Abnahme des Lichtmodulationsgrades mit der Quadratwurzel aus der Frequenz bis an das Ende des Bereiches. Eine völlige Lichtmodulation von 100% ist mit überlagerten sinusförmigen Strömen nicht erreichbar, der günstigste Wert beträgt bei mittleren Frequenzen etwa 95%. Die Zeitdifferenz zwischen dem Strom- und dem Lichtmaximum nimmt zwischen 50 Hz und 100 kHz von 100 μs auf 2 μs ab.

5. Die linearen und nichtlinearen Verzerrungen des modulierten Lichtes sind so gering, daß einer Anwendung der Quecksilberhochdruckentladung für elektroakustische Zwecke nichts im Wege steht, nachdem auch die Gefahr einer ungewollten Unterbrechung des Bogens durch die Einführung einer unmodulierten Hilfsentladung beseitigt worden ist.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Dr. A. Karolus für die vielfältige Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit meinen herzlichsten Dank aussprechen. Ebenso bin ich der Studiengesellschaft für elektrische Beleuchtung im Osram-Konzern, insonderheit Herrn Dr. Ewest und Herrn Dr. R. Rompe zu großem Dank verpflichtet.

Schrifttum.

- [1] H. Köhler, Die Lichtmodulation wechselstromgeheizter Glühlampen im Tonfrequenzgebiet. ENT **15**, 111 u. 154 (1938). — [2] W. Duddell, Electrician **46**, 269 (1900). — [3] H. Th. Simon, Phys. Z. **3**, 278 (1901). — [4] E. Ruhmer, ETZ **25**, 1021 (1904). — [5] J. Jaumann, Z. Phys. **59**, 386 (1930). — [6] Q. Majorana, Linc. Rend. Rom **5**, 726 (1927). — [7] W. Elenbaas, Physica, s'Grav. **3**, 12 (1936). — [8] E. G. Andresen, Licht **7**, 235 (1937). — [9] W. Uytterhoeven, Elektrische Gasentladungslampen. S. 258. Berlin: Jul. Springer 1938. — [10] Osram-Liste **52**, 3 (1937). — [11] R. Rompe u. W. Thouret, Z. techn. Phys. **17**, 377 (1936). — [12] J. Keßler, Funktechn. Mh. **9**, 344 (1935). — [13] K. Steimel, Telefunkenröhre **3**, 91 (1935). — [14] E. Alberti, Braunsche Kathodenstrahlröhren. S. 174. Berlin: Jul. Springer 1932. — [15] E. Alberti, Funktechn. Mh. **1**, 1 (1935). — [16] F. Vilbig, Hochfrequenztechnik. S. 426. Leipzig: Akad. Verlagsges. 1937. — [17] K. Küpfmüller, Fachber. d. VDE (1926). — [18] W. Graffunder, W. Kleen, W. Wehnert, Telefunkenröhre **4**, 142 (1935). — [19] E. Klein, Funktechn. Mh. **11**, 341 (1937). — [20] Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen II. 5. Aufl. Hptbd. S. 1335. — [21] Jenaer Farb- und Filtergläser, Liste 4777 u. 4892 E. — [22] AEG-Druckschrift Rs/V 3, Technische Photozellen. S. 5. Berlin 1935. — [23] M. N. Saha, Phil. Mag. **40**, 472—488 (1920). — [24] v. Engl u. Steenbeck, Wiss. Veröff. Siemens-Konz. XII, 1, 74 (1933). — [25] R. Rompe u. W. Thouret, Z. techn. Phys. **19**, 352—355 (1938).

(Eingegangen am 24. Februar 1940.)

Lebenslauf.

Am 26. Februar 1913 wurde ich in Zeitz geboren. Von Ostern 1919 bis Ostern 1922 besuchte ich die Städtische Mittelschule in Zeitz, von Ostern 1922 bis Ostern 1931 die Städtische Humboldt-Oberrealschule, deren Besuch ich mit der Reifeprüfung abschloß. Im Jahre 1931/32 war ich als Volontär in der elektrotechnischen Industrie tätig. Vom Sommersemester 1932 bis zum Wintersemester 1933/34 und vom Sommersemester 1935 bis zum Sommersemester 1938 studierte ich an der Universität Leipzig Physik, Mathematik und Physikalische Chemie. Im Sommersemester 1934 und im Wintersemester 1934/35 studierte ich an der Technischen Hochschule Danzig Elektrotechnik, Physik und Mathematik.

Seit dem 1. Juli 1936 bin ich Assistent der Abteilung für Angewandte Elektrizitätslehre im Physikalischen Institut der Universität Leipzig, wo die vorliegende Arbeit ausgeführt wurde.

Max Herbert Mangold.