

SAMMLUNG VIEWEG
TAGESFRAGEN AUS DEN GEBIETEN
DER NATURWISSENSCHAFTEN
UND DER TECHNIK

Heft 110

Köhler – Rompe

Die elektrischen
Leuchtröhren



SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH



Die „Sammlung Vieweg“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren **augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten**. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig, und zwar für:

- Physik** (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):
Herr Geh. Reg.-Rat Prof. Dr., Dr.-Ing. E. h. **Karl Scheel**, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;
- Chemie** (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):
Herr Prof. Dr. **Bernhard Neumann**, Techn. Hochschule Breslau;
- Technik** (Wasser-, Straßen- und Brückenbau, Maschinen- und Elektrotechnik, Schiffsbau, mechanische, physikalische und wirtschaftliche Probleme der Technik):
Herr Prof. Dr.-Ing. E. h. **Fritz Emde**, Techn. Hochschule Stuttgart.

Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 31. Dr. Heinrich Faßbender: *Die technischen Grundlagen der Elektro-medicin*. Mit 77 Abbildungen. M. 3,60.
- Heft 32/33. Prof. Rudolf Richter: *Elektrische Maschinen mit Wicklungen aus Aluminium, Zink und Eisen*. Mit 51 Abbildungen. M. 5,40.
- Heft 34. Obering. Carl Beckmann: *Haus- und Geschäfts-Telephonanlagen*. Mit 78 Abbildungen. M. 2,70.
- Heft 35. Dr. Aloys Müller: *Theorie der Gezeitenkräfte*. Mit 17 Abb. M. 2,70.
- Heft 36. Prof. Dr. W. Kummer: *Die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen*. Mit 7 Abbildungen. M. 2,25.
- Heft 37. Dr. Reinhold Rieke: *Die Arbeitsmethoden der Silikatchemie*. 2. Aufl. Mit 4 Abbildungen. M. 3,15.
- Heft 39/40. Dr. Richard Grammel: *Die hydrodynamischen Grundlagen des Fluges*. Mit 83 Abbildungen. M. 4,50.
- Heft 41/42. Ingenieur Georg Duffing: *Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung*. Mit 23 Abb. M. 4,25.
- Heft 43. Dr. Robert Schwarz: *Feuerfeste und hochfeuerfeste Stoffe*. 2. vermehrte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 1,80.
- Heft 44. Dr. Iwan Döry: *Einphasenbahnmotoren*. Mit 75 Abbildungen. M. 2,70.
- Heft 45. Prof. Dr. K. Fajans: *Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen*. Durchgesehener Abdruck der 4. Auflage. Mit 11 Abbildungen und 14 Tabellen. M. 4,50.
- Heft 46. Dr. Bruno Alexander-Katz: *Quarzglas und Quarzgut*. Mit 43 Abb. M. 2,25.

Fortsetzung siehe 3. und 4. Umschlagseite.

Die elektrischen Leuchtröhren

Von

Walter Köhler und Robert Rompe



Mit 60 Abbildungen und 5 Tabellen

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Herausgeber dieses Heftes:
Geh. Reg.-Rat Prof. Dr.-Ing. e. h. Karl Scheel, Berlin

ISBN 978-3-322-98227-8 ISBN 978-3-322-98916-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-98916-1

Alle Rechte vorbehalten

Zum Geleit

Es kann heute noch nicht überblickt werden, in welcher Weise die neueren Erkenntnisse und technischen Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Entladungsröhren die praktische Beleuchtungstechnik beeinflussen werden. Da aber eine Reihe von Röhrentypen bereits serienmäßig hergestellt werden und mit einer Anzahl verschiedener Ausführungsformen praktische Versuche im größeren Umfange laufen, erscheint es zweckmäßig, die Entwicklung und den heutigen Stand der Technik der Entladungsröhren zusammenzufassen. Dies erscheint auch aus dem Grunde verdienstvoll, um ein Gebiet, das dem Elektrotechniker meist etwas ferner liegt, über den Kreis der engeren Fachgenossen hinaus, nicht nur dem Lichttechniker, sondern auch dem Ingenieur nahezubringen.

Berlin, im Juli 1933

M. Pirani

Vorwort

Die Entwicklung der Entladungsröhren, der Gas- und Metall-dampflampen, hat in den letzten Jahren außerordentliche Fortschritte gemacht, und es haben sich vor allem durch Ausbildung der Hochleistungsröhren für Netzanschluß eine Fülle neuer physikalischer Erkenntnisse auf dem Gebiete der Lichterzeugung, sowie zum Teil ganz neue Anwendungsmöglichkeiten solcher Röhren ergeben. Wenn auch über alle Fortschritte ständig in der Fachliteratur berichtet wurde, so liegt bei dem großen Interesse, das gerade dieses Gebiet auch außerhalb des engeren Fachkreises gefunden hat, das Bedürfnis nach einer knappen und doch alles Wesentliche berücksichtigenden Darstellung der Entwicklung und des heutigen Standes unserer Kenntnis der Entladungsröhren vor.

Auf Anregung von Herrn Direktor Prof. Dr. Pirani unternahmen es daher die Verfasser, eine solche Übersicht zu geben, wobei sie es sich zur Aufgabe machten, eine möglichst allgemeinverständliche Form der Darstellung zu wählen. An denjenigen Stellen, an denen die Vollständigkeit einen Hinweis auf physikalische Vorgänge wünschenswert erscheinen ließ, wurden durch kleinen Druck gekennzeichnete Absätze eingeschoben, derart, daß der Leser diese auch auslassen kann, ohne daß dadurch der Zusammenhang für ihn verlorengeht. Ebenso sind, um die Allgemeinverständlichkeit der Darstellung in Kap. II nicht zu gefährden, die physikalischen Grundlagen der Gasentladung dort nur angedeutet und im übrigen in einem besonderen Abschnitt als Anhang behandelt. Auf die Behandlung von herstellungstechnischen Fragen wurde in Rücksicht auf den Umfang der Darstellung fast ganz verzichtet, mit Ausnahme solcher Probleme, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Wesen der Gasentladung stehen,

Großer Wert wurde auf eine einheitliche Begriffsbezeichnung gelegt in der Hoffnung, daß damit diese kleine Schrift mit dazu beitragen möge, die Vielheit und Uneinheitlichkeit, wie sie hierin zurzeit besteht, zu beseitigen.

Berlin, im Juni 1933

Die Verfasser

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Erstes Kapitel: Grundlegendes über elektrische Licht- erzeugung	1
Zweites Kapitel: Vom Wesen der Gasentladung und ihren Erscheinungsformen	10
Drittes Kapitel: Die Entwicklung der Gasentladungslampen	18
Viertes Kapitel: Die Hochleistungsröhren für Netzanschluß	25
1. Anpassung der Betriebsspannung an die Netzspannung . . .	26
2. Erhöhung der Leuchtdichte	36
3. Die Ökonomie der Lichterzeugung	39
4. Anpassung der Lichtfarbe an den Verwendungszweck	47
Fünftes Kapitel: Verwendungsmöglichkeit der Hochleistungs- leuchtröhren für Netzanschluß	51
 Anhang 	
Physikalische Grundlagen der Gasentladung.	67
1. Die Elemente der elektrischen Gasentladung.	67
2. Die Wechselwirkungen zwischen Atomen und Elektronen . .	73
3. Der Mechanismus der elektrischen Gasentladung	79
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	90
Sachverzeichnis	93

Tabelle I
Bezeichnungen und Einheiten

Bezeichnung	Formelzeichen	Maßeinheit	Einheitszeichen
Spannung	E	Volt	V
Stromstärke	J	Ampere	A
Widerstand	R	Ohm	Ω
Leistung	L	Watt	W
Lichtstrom	Φ	Lumen	Lm
Lichtmenge	Q	Lumenstunde	Lmh
Lichtstärke	I	Hefnerkerze	HK
Beleuchtungsstärke	E	Lux	Lx
Leuchtdichte	B	Stilb	Sb
Lichtausbeute	A	Lumen/Watt	Lm/W
Strahlungsintensität	E_λ		
Temperatur	T	Grad absolut	$^\circ\text{K}$
	t	Grad Celsius	$^\circ\text{C}$
Wellenlänge	λ	Meter	m
		Angström	$\text{\AA} = \text{m} \cdot 10^{-10}$
Frequenz	f	Sekunde	sec^{-1}
Dampfdruck	p	Atmosphäre	at
		mm Quecksilbersäule	mm Hg

Vorsätze zur Bezeichnung von Vielfachen und Teilen
der Einheiten

M	Mega	= 10^6	= 1000000
k	Kilo	= 10^3	= 1000
c	Zenti	= 10^{-2}	= 0,01
m	Milli	= 10^{-3}	= 0,001
μ	Mikro	= 10^{-6}	= 0,000001

Tabelle II
Die verschiedenen Möglichkeiten
der Lichterzeugung durch elektrische Gasentladung

Art der Lichtausstrahlung		Art der Lampen			Spannung und Stromart	Lichtstrom in Wefier-Lumen etwa	Lichtausbeute in Hm/Watt etwa	Nutzlebensdauer in Stunden etwa	
negatives Glimmlicht		Glimm-Lampen			Gleich- und Wechselstrom von 110 Volt an	3	1,3	über 1000	
		Moore-Licht mit	Stickstoff Kohlensäure	als Füllgas		400... 800 ^{*)}	8		
positive Lichtsäule	Großer Spannungsabfall an der Kathode (kalte Elektroden)	Reine Lumineszenzstrahlung			Edelgasleuchtröhren (Füllgas: Neon)	ohne	nur Wechselstrom von 1500 bis 25.000 Volt	in Klarglas (rotes Licht) 600... 700 ^{*)}	2000
						mit	Zusatz von Quecksilber	in Klarglas (blaues Licht) 300... 400 ^{*)}	
								intragefärbtes Glas (grünes Licht) 200... 300 ^{*)}	
	Kleiner Spannungsabfall an der Kathode (heiße Elektroden)	wesentlicher Anteil an Lumineszenzstrahlung	Edelgasleuchtröhren (Hochleistungsrohren) und Metaldampflampen			Gleichstrom u. Wechselstrom von 110 Volt an	Lichtstrom und Leistungsaufnahme abhängig von den Abmessungen	bis zu 60	—
					Salarca-Lampe	Lichtleistung unwesentlich, da die Lampe als Ultravioletstrahler dient	200		
					Effektkohlen-Bogenlampe	1000... 30000	25... 35	—	
	unwesentlicher Anteil an Lumineszenzstrahlung	Wolfram-Bogenlampe			1800... 12000 (je nach Stromstärke)	20... 25	je nach Type 150... 300		
		Reinkohlen-Bogenlampe			Lichtstrom u. Leistungsaufnahme hängen von den Abmessungen der Kohlen ab	8... 14	—		

^{*)} je 1 Meter Rohrlänge bei handelsüblichem Durchmesser

Literaturverzeichnis

Physikalische Grundlagen der Lichterzeugung und Temperaturstrahlung fester Körper

Geiger-Scheel: Handb. d. Phys., Bd. XIX u. XX.

Allgemeines über Gasentladung

R. Seeliger: „Physik der Gasentladung“, 1927.

A. v. Engel und M. Steenbock: „Elektrische Gasentladungen, ihre Physik und Technik“, 1932.

Technik der Gasentladungslampen

W. Arndt: „Winke für die Herstellung von Leuchtröhren“, 1932.

P. Möbius: „Neonleuchtröhren, ihre Fabrikation und Anwendung“, 1932.

Anwendungen der Gasentladungslampen

F. Schroeter: „Die Glimmlampe, ein vielseitiges Werkzeug des Elektrikers“, 1928.

H. Ewest: „Anwendung der Glimmlampe“. Technisch-wissenschaftliche Abhandlungen aus dem Osram-Konzern 1930, Bd. 1.

F. Abshagen: „Neuere Ausführungsformen der Glimmlampen“. Elektrotechnischer Anzeiger 1930, Nr. 61.

L. Bloch: „Das Neon-Quecksilbergemisch als Lichtquelle für Filmaufnahmen“. Kintotechnik 1930, Nr. 1.

M. Pirani: „Fortschritte und Entwicklungsmöglichkeiten in der Erzeugung künstlicher Lichtquellen“. Forschungen und Fortschritte 1930.

M. Pirani: „Fortschritte und Entwicklungsmöglichkeiten auf dem Gebiete der Leuchtröhren“. ETZ. 1930, Nr. 25.

H. Ewest: „Die Gasentladungsröhren in der Fernsehtechnik“. Fernsehen 1930, Nr. 2.

H. Ewest: „Neuere Entwicklung der Gasentladungslampen für Fernseh-zwecke“. Fernsehen und Tonfilm 1932, Nr. 1.

H. Ewest: „Lichtquellen für Tonfilmaufnahmen“. Zeitschr. f. techn. Phys. 1931, Nr. 12.

v. Göler und M. Pirani: „Über die Anwendung von Leuchtröhren“. Bericht Nr. 51 d. Int. Bel. Kong. Engl. 1931.

v. Göler und M. Pirani: „Leuchtröhren als photographische Normallichtquellen“. Zeitschr. f. techn. Phys. 1931, Nr. 3.

M. Pirani: „Neue Gasentladungslichtquellen“. Die Lichttechnik 1931, Nr. 1.

M. Pirani: „Neue Gasentladungsstrahler“. Technisch-wissenschaftliche Abhandlungen aus dem Osram-Konzern 1931, Bd. 2.

M. Pirani und R. Rompe: „Über eine neue Lichtquelle für das Eisen-spektrum“. Zeitschr. f. techn. Phys. 1932, Nr. 3.

Erstes Kapitel

Grundlegendes über elektrische Lichterzeugung

Jede Lichtquelle ist ein „Sender“, der Energie von ganz bestimmter Art ausstrahlt, physikalisch ausgedrückt: elektromagnetische Schwingungen bestimmter Wellenlänge in den Raum hinausendet. Von dem ungeheuren Wellenlängenbereich der möglichen elektromagnetischen Energiestrahlungen (Abb. 1) ist die Netzhaut unseres

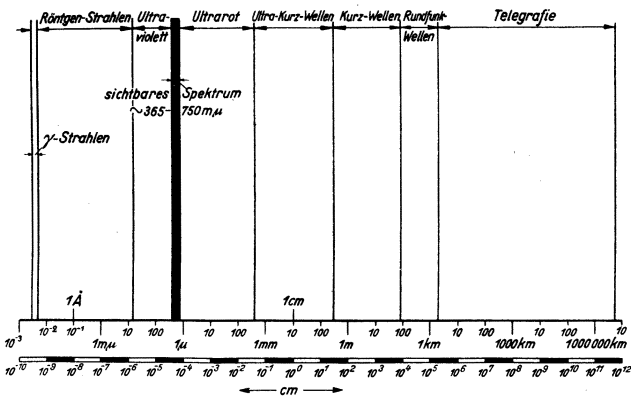


Abb. 1. Wirkungs- und Verwendungsbereich elektromagnetischer Wellen (Gesamtbereich der Energiestrahlung)

Auges als „Empfänger“ nur für einen verhältnismäßig kleinen Ausschnitt empfindlich, und nur wenn Strahlung dieser Art von einem Sender ausgesandt wird, kann man ihn als „Lichtquelle“ bezeichnen. Sowie also z. B. der Berliner Rundfunksender auf einer Wellenlänge von 419 m sendet, müssen unsere Lichtquellen auf Wellenlängen senden, die etwa zwischen 400- und 700millionstel Millimeter ($m\mu$) liegen. Denken wir uns die Wellenlängen, wie sie vom Radio her bekannt sind, immer kleiner und kleiner werden, so gelangt man,

angefangen von den langwelligen Telegraphiesendern, über „Königswusterhausen“ und „Berlin“ zu den Kurzwellen und „Ultra-Kurzwellen“ und schließlich zu Sendern, die man als Wärmestrahler bezeichnet. Ein Ofen z. B. dürfte, wenn er gerade noch nicht glüht, auf Wellenlängen von etwa $\frac{1}{100}$ mm strahlen und eine Heizsonne entsprechend auf etwa $\frac{1}{1000}$ mm und weniger; von der Heizsonne wissen wir jedoch, daß wir die Strahlung nicht nur als Wärme empfinden, sondern auch schon etwas „sehen“: Die Heizsonne arbeitet bereits als Lichtquelle, sie glüht deutlich rötlich-gelb. Die Wellenlängen dieser Strahlung, für die das Auge empfindlich ist, sind kürzer als die der Wärmestrahlung, sie liegen bereits in dem

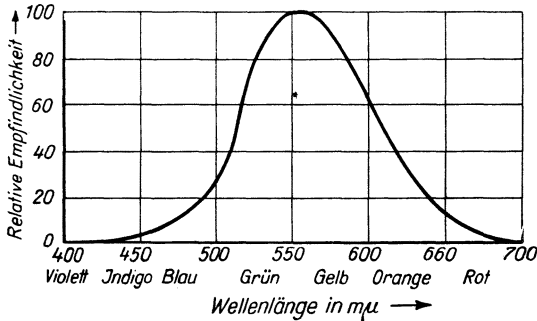


Abb. 2. Empfindlichkeit des menschlichen Auges für die verschiedenen Wellenlängen der sichtbaren Strahlung

genannten Bereich der sichtbaren Strahlung. Dabei hat das Auge die Fähigkeit, innerhalb dieses kleinen Bereichs einen Unterschied zwischen den Wellenlängen zu machen, es ist farbempfindlich. Die langwelligeren Strahlen rufen einen roten, die kurzwelligeren einen blauen oder violetten Farbeindruck hervor, während die Strahlen mittlerer Wellenlänge eine gelbe oder grüne Farbeempfindung auslösen, und zwar ist die Empfindlichkeit der Netzhaut des Auges im Gelb-grünen bei einer Wellenlänge von $555 \text{ m}\mu$ am größten. Gelbgrüne Strahlung wirkt daher „heller“ als rote oder blaue Strahlung gleicher Energie (Abb. 2).

Innerhalb des kleinen Bereiches von 400 bis $700 \text{ m}\mu$ kann nun wieder die Art, wie sich die Strahlung unserer Lichtquellen auf die einzelnen Wellenlängen verteilt, ganz verschieden sein. So

sendet z. B. unsere natürliche Lichtquelle, die Sonne, Licht aller Wellenlängen des genannten Bereiches aus, sie hat, wie man sagt, ein „kontinuierliches Spektrum“ oder anders ausgedrückt, das Sonnenspektrum enthält alle (Spektral-) Farben fortlaufend in einander übergehend vom Rot, Orange, Gelb bis zum Grün, Blau, Indigo und Violett. Ebenso ist es bei der elektrischen Glühlampe; auch ihre Lichtstrahlung ist kontinuierlich, wobei allerdings die einzelnen Farben in einem anderen Stärkeverhältnis zueinander auftreten, wie im Sonnenlicht, und das gleiche gilt überhaupt für fast alle diejenigen Lichtquellen, bei denen ein Leuchtkörper durch Erwärmung zur Lichtaussendung angeregt wird. Diese Art der Lichterzeugung und Lichtaussendung (wie sie auch bei den

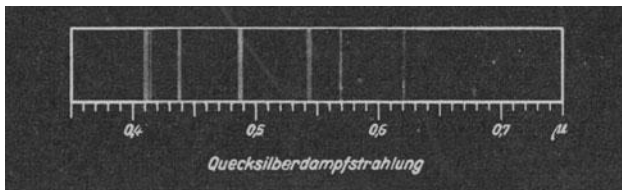


Abb. 3. Linienspektrum

ältesten Lichtquellen, dem Kienspan, der Öllampe und Kerze vorliegt) bezeichnet man als „Temperaturstrahlung“.

Außer diesen Lichtquellen mit kontinuierlichem Spektrum gibt es Strahler, die nur auf einer oder mehreren ganz bestimmten Wellenlängen senden, wie z. B. der Natrium-Bunsenbrenner, der fast nur gelbes Licht von der Wellenlänge $589 \text{ m}\mu$ aussendet oder wie die Quecksilberdampfampe (Abb. 3), die zwar mehrere Farben aussendet, aber nicht kontinuierlich, sondern nur von ganz bestimmten Wellenlängen. Dies entspricht den Verhältnissen, wie sie bei den einzelnen Rundfunksendern vorliegen: jeder Sender strahlt auf einer ganz bestimmten Wellenlänge. Diese Art von Ausstrahlung wird in der Physik als „Linienspektrum“ bezeichnet, und es besitzen daher so wie die verschiedenen Radiosender auch die oben genannten Lichtquellen, also die Natriumbunsenbrenner oder die Quecksilberdampfampe, ein Linienspektrum. Das Licht dieser Strahler ist durch die Farben, die diesen Wellenlängen ent-

sprechen, bestimmt, die Strahlung ist nach diesen Wellenlängen „geordnet“. Es ist daher vorgeschlagen worden, diese Lichtquellen „geordnete Strahler“ zu nennen; man könnte dann von einer geordneten Strahlung sprechen im Gegensatz zu den Temperaturstrahlern, die Licht aller Wellenlängen aussenden, eine „ungeordnete“ Strahlung besitzen und daher auch „ungeordnete Strahler“ genannt werden¹⁾. In unserem Beispiel aus der Radiotechnik könnte man die ungeordneten Strahler mit den beliebten Hochfrequenzstörern vergleichen, die ja auch einen mehr oder weniger ausgedehnten Wellenlängenbereich einnehmen, also im Gegensatz zu den „wohl geordneten“ Radiosendern stehen.

Man hat nun bemerkt, daß die Linienspektren, also die geordnete Strahlung, fast nie bei Anregung der Körper zur Lichtemission durch Erhitzung auftreten, sondern meist bei anderen Anregungsarten, z. B. in elektrischen Entladungsröhren oder bei chemischen Reaktionen. Man hatte für diese Prozesse der Lichterzeugung ursprünglich den Namen „Lumineszenzstrahlung“ eingeführt, Temperaturstrahler und Lumineszenzstrahler unterschieden. Diese früher übliche Unterscheidung ist aber nach dem Stande unserer heutigen Kenntnis physikalisch nicht mehr zu rechtfertigen, da ausgesprochene Lumineszenzstrahler unter geeigneten Bedingungen auch Temperaturstrahler sein können (s. S. 77 und folgende). Allerdings liegt bei der geordneten Strahlung fast stets Strahlung von Gasen, d. h. also von Materie in fein verteilten Zuständen vor, während die ungeordnete Strahlung meist an feste oder allenfalls flüssige Körper gebunden ist, also an Materie in wesentlich festerer Packung.

Die zunächst rein theoretische Unterscheidung zwischen ungeordneter und geordneter Strahlung gewinnt praktische Bedeutung, sobald man Betrachtungen über die optimale Lichtausbeute der Lichtquellen der einen oder anderen Art anstellt. Die ungeordnete Strahlungsanregung, wie sie also z. B. bei der Glühlampe vorhanden ist, gehorcht gewissen statistischen Gesetzmäßigkeiten, die in den optischen Strahlungsgesetzen ihren Ausdruck finden. Es sind dies das Stefan-Boltzmannsche und das Wien-Plancksche Gesetz,

¹⁾ Über die physikalische Grundlage dieser Unterscheidung siehe „Anhang“ S. 77.

die für einen idealisierten Temperaturstrahler gelten: je höher die Temperatur des Strahlers, um so größer die ausgestrahlte Gesamtstrahlung und um so größer der Anteil an kurzwelliger Strahlung. Dieser idealisierte Temperaturstrahler wird durch den absolut schwarzen Körper dargestellt, der alles Licht, das auf ihn trifft, restlos absorbiert und umgekehrt, wenn er durch Temperaturerhöhung zur Lichtaussendung angeregt wird, auf allen Wellenlängen das Maximum an Energie aussendet, welches überhaupt irgendein

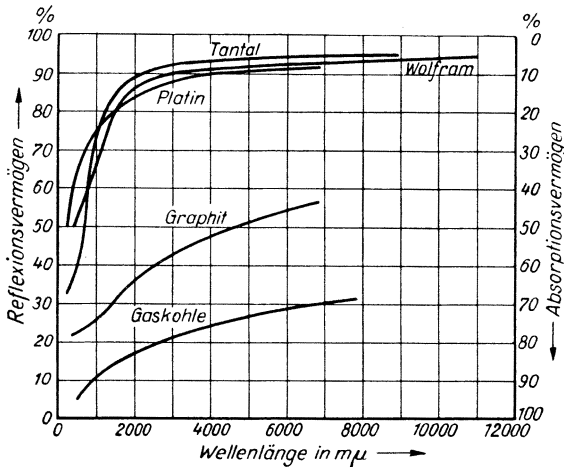


Abb. 4. Abhängigkeit des Reflexions- und Absorptionsvermögens verschiedener Stoffe von der Wellenlänge

Körper bei Erwärmung, oder wie man nach dem Vorstehenden auch sagen kann, bei „ungeordneter Anregung“ für die betreffende Wellenlänge auszusenden vermag.

Für den schwarzen Körper ist das Absorptionsvermögen, d. h. das Verhältnis der von dem Körper absorbierten Strahlung zu der auf den Körper auftreffenden Gesamtstrahlung gleich 1. In der Praxis ist das Absorptionsvermögen der Stoffe stets kleiner als 1, und damit nach dem Kirchhoffschen Gesetz das Emissionsvermögen kleiner als das des schwarzen Körpers; da das Absorptionsvermögen überdies von der Wellenlänge abhängig (Abb. 4) ist, muß man den Zusammenhang zwischen den Strahlungsgrößen und der Temperatur empirisch ermitteln. Für kleine Wellenlängenbereiche lassen sich die meisten Substanzen als „Graustrahler“ ansehen, d. h. ihr Absorptionsvermögen als eine von der Wellenlänge unabhängige Größe kleiner als 1 angeben.

Wird der schwarze Körper allmählich erwärmt, so wächst die gesamte ausgestrahlte Energie mit zunehmender Temperatur stark an, bei Verdoppelung der Temperatur, also bei einer Erwärmung von z. B. 750 auf 1500°, versechzehnfacht sich die ausgesandte Energie. Hierbei erfolgt bei geringeren Temperaturen die Ausstrahlung zunächst in dem ultraroten Gebiet als Wärmestrahlung bei Wellenlängen von einigen tausendstel Millimetern, unser Auge hat also, wie oben erwähnt, noch keinen Empfang. Gleichzeitig wandert aber mit zunehmender Temperatur das Maximum der Energiestrahlung zu immer kleineren Wellenlängen hin, bis schließlich auch im sichtbaren Gebiet Strahlung erfolgt (Abb. 5). Es mußte daher

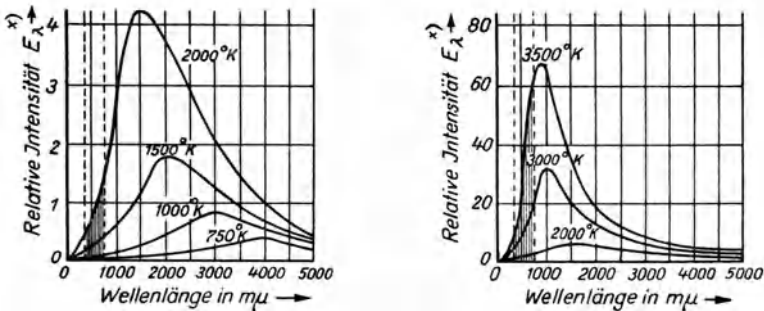


Abb. 5. Energieverteilung der Strahlung des schwarzen Körpers

das Streben der Glühlampentechnik sein, Leuchtkörpermaterialien zu finden, die bei möglichst hohen Temperaturen betrieben werden können, um den in das sichtbare Gebiet fallenden Anteil der Strahlung möglichst groß zu machen und so eine möglichst gute Wirtschaftlichkeit der Energieumsetzung, eine gute „Lichtausbeute“ zu erhalten. Die Sonne hat eine Oberflächentemperatur von ungefähr 6000° C, während unsere heutigen Glühlampen mit Temperaturen von etwa 2100 bis 2600° C arbeiten. Die Sonne strahlt dementsprechend im Blau mehr als die Glühlampe, und dies hat physiologisch den Effekt zur Folge, daß das Sonnenlicht „weiß“, das Glühlampenlicht „gelblich“ erscheint. Bei den genannten Glühlampentemperaturen werden dabei Lichtausbeuten bis zu 30 und mehr Lumen je Watt erreicht, d. h. ungefähr 30 % dessen, was theoretisch unter Berücksichtigung der für die verschiedenen Farben auch verschiedenen Augenempfindlichkeit (Abb. 2) durch Temperaturstrahlung eines schwarzen Körpers

möglich ist (Abb. 6). Dieses Optimum der Lichterzeugung wird bei 6500° erreicht; dies ist aber, wie schon erwähnt, angenähert die

<i>Lichtquelle</i>	<i>Art der Strahlung</i>	<i>Visueller Nutzeffekt der Gesamtstrahlung in %</i>	<i>Aufzuwendende Leistg. zur Erzeugung der Lichtstrahleinheit W/Lm</i>	<i>Lichtausbeute Lm/W</i>
<i>Theoretische Werte</i>				
<i>Absolut schwarzer Körper</i>	<i>Für jede Temperatur maximale Strahlungsintensität auf jeder Wellenlänge</i>	<i>Optimaler Wert bei 6500° abs. 13,9</i>	$0,00145 \times \frac{100}{13,9} = 0,0104$	$6896 \times \frac{13,9}{100} = 95,9$
		<i>Maximaler Wert bei 3000° abs. 3,1</i>	$0,00145 \times \frac{100}{3,1} = 0,0468$	$6896 \times \frac{3,1}{100} = 21,4$
<i>Praktische Werte</i>				
<i>Wolframdraht-Glühlampe</i>	<i>Strahlung ähnlich der des schwarzen Körpers, aber Zunahme des Emissionsvermögens mit abnehmender Wellenlänge</i>	<i>zur Zeit erreichter Höchstwert bei ~ 3000° abs. 4,4</i>	$0,00145 \times \frac{100}{4,4} = 0,0329$	$6896 \times \frac{4,4}{100} = 30,3$

Abb. 6. Theoretisch mögliche und praktisch erreichbare Werte der Lichtausbeute für ungeordnete Strahlung (Temperaturstrahlung) ¹⁾

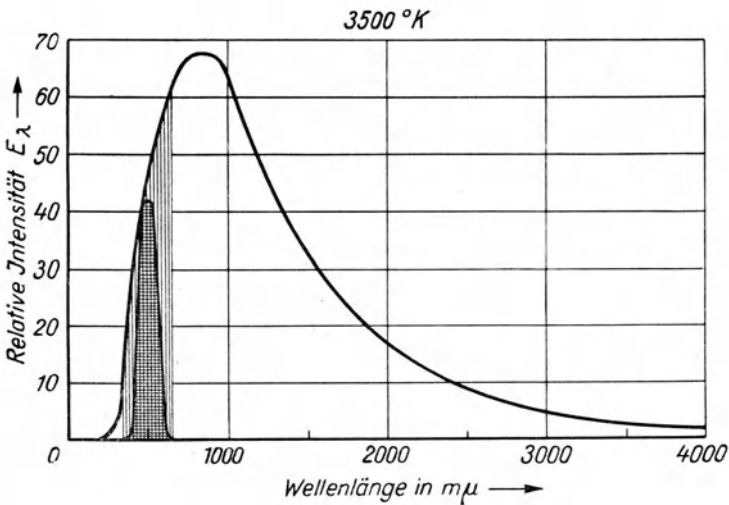


Abb. 7. Spektrale Energie- und Helligkeitsverteilung des schwarzen Körpers bei 3500° K

Temperatur der Sonne, und es ist dies kein Zufall, da unser Sehorgan sich biologisch in einer Welt entwickelt hat, deren Hauptlichtquelle die Sonne ist.

¹⁾ Der Wert 0,00145 ist das mechanische Lichtäquivalent; Erklärung siehe S. 9 und 45.

Die Empfindlichkeit des Auges für Lichtreize gleicher absoluter Stärke ist abhängig von der Wellenlänge; es ist daher zur Bestimmung des Wirkungsgrades, also der Lichtausbeute einer Lichtquelle, letztendlich nicht das Verhältnis der in das sichtbare Gebiet fallenden Strahlung zur Gesamtstrahlung der Lichtquellen — der optische Nutzeffekt — maßgeblich, sondern es ist der Anteil der Strahlung bestimmend, der im sichtbaren Gebiet entsprechend der Augenempfindlichkeit ausgestrahlt wird, wie er also durch die sogenannte Helligkeitskurve (Augenempfindlichkeit \times Energie) dargestellt wird. Für die Strahlung des schwarzen Körpers bei $T = 3500^\circ \text{K}$ ist in Abb. 7 diese Helligkeitskurve eingezeichnet.

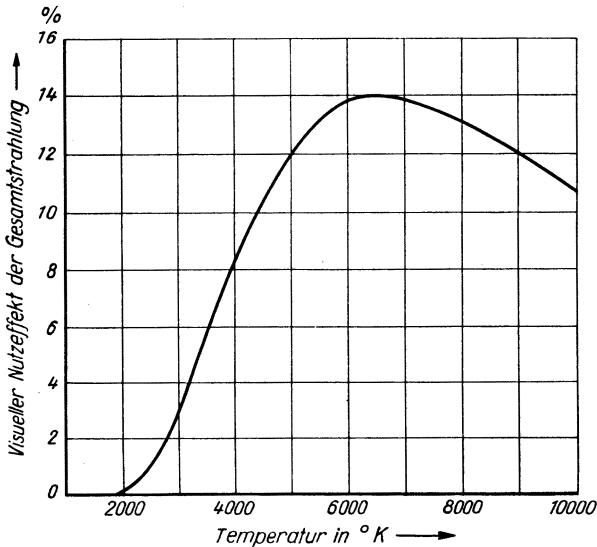


Abb. 8. Visueller Nutzeffekt der Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers

Das Verhältnis des auf das sichtbare Gebiet entfallenden, nach der Lichtwirkung beurteilten Teiles der Strahlung zur Gesamtstrahlung, nennt man den visuellen Nutzeffekt. Für den schwarzen Körper hat dieser bei etwa 6500°C mit 13,9% sein Maximum (Abb. 8). Dies zeigt also, wie gering die spezifische Leistung des schwarzen Körpers ist. Allerdings ist, wie bereits (s. S. 5) erwähnt, zu berücksichtigen, daß bei allen als Lichtstrahler benutzten Metallen das Emissionsvermögen mit kleiner werdender Wellenlänge zunimmt, so daß die Lichtausbeute mit höher werdender Temperatur größer wird als beim schwarzen Körper.

Die Augenempfindlichkeitskurve gestattet lediglich relative Werte für die verschiedenen Wellenlängen anzugeben; man kann aber die tatsächliche Leistung, die einem bestimmten Lichtstrom entspricht, für alle Wellenlängen berechnen, wenn man sie für irgendeine bestimmte Wellenlänge kennt. Man bezeichnet diejenige Leistung in Watt, die zur

Lichterzeugung von 1 Lm bei der Wellenlänge $\lambda = 555 \text{ m}\mu$ der maximalen Augenempfindlichkeit aufzuwenden ist, als das mechanische Lichtäquivalent (P). Bedeutet S_λ die Gesamtstrahlung für die Wellenlänge λ , φ_λ die relative Augenempfindlichkeit und Φ den Lichtstrom, so ist

$$P = \int_0^\infty \frac{S_\lambda \varphi_\lambda d\lambda}{\Phi}$$

Für den Fall des Linienspektrums muß man an Stelle der dann nicht möglichen Integration die Summe der für die verschiedenen in Frage kommenden Wellenlängen vorhandenen Helligkeitswerte bilden (Abb. 9).

λ	J_λ	$J_\lambda \cdot \varphi_\lambda$	$J_\lambda \cdot \varphi_\lambda \cdot 1/P = A$
5852	2,8	2,28	15,72
5944	4,1	2,88	19,86
6096	5,2	2,63	18,74
6143	10,3	4,66	32,14
6266	4,8	1,46	10,07
6334	8,3	1,95	13,45
6382	8,3	1,60	11,03
6402	27,7	4,84	33,38
6506	11,0	1,15	7,93
6678	6,1	0,22	1,52
6929	2,7	0,02	0,14
7032	8,7	0,03	0,21
$\Sigma =$	100	23,72	163,59

$J_\lambda =$ relative Intensität der Linie, also $\frac{S_\lambda}{\Phi}$
 $\varphi_\lambda =$ Augenempfindlichkeit
 $P =$ mechanisches Lichtäquivalent
 $A =$ Lichtausbeute

Abb. 9. Berechnung der Helligkeitssumme für reine Neonstrahlung auf Grund von Messungen der relativen Intensitäten

Zahlenmäßig hat das mechanische Lichtäquivalent den Wert $0,00145 \text{ W/HLm}$ oder $\frac{1}{P} = 689,6 \text{ HLm/W}$. (Photometrisches Strahlungsäquivalent.) (Siehe auch S. 45, Abb. 29.)

Der Gelb-Grün-Strahler, der die ganze zugeführte Energie in Lichtenergie von der Wellenlänge $\lambda = 555 \text{ m}\mu$ umsetzt, wird also eine Lichtausbeute von $689,6 \text{ HLm/W}$ besitzen und für einen solchen Strahler wäre der visuelle Nutzeffekt 100%. Für den schwarzen Körper von 6000° C war, wie Abb. 8 zeigt, der visuelle Nutzeffekt 13,9%.

Dieser entspricht also einer Lichtausbeute von $\left(689,6 \cdot \frac{13,9}{100}\right)$ etwa $95,9 \text{ HLm/W}$.

Bei der geordneten Strahlungsanregung hat man es, wie oben erwähnt, im Gegensatz zur ungeordneten Strahlung in der Hand, durch geeignete Art der Energiezufuhr — wie wir aus den folgenden Darstellungen ersehen werden — den Spektralbereich anzuregen, der unter den obwaltenden Umständen am geeignetsten ist, und so zu einer optimalen Lichtausbeute zu kommen, die wesentlich höher ist. Die elektrischen Lichtquellen dieser Art sind die Gasentladungslampen. Während bei der Glühlampe der elektrische Strom durch einen festen Leiter, nämlich den Wolframdraht, hindurchgeschickt wird und diesen soweit erwärmt, daß er zum Glühen kommt und Licht aussendet, wird bei den Gasentladungslampen ein geeignetes Gas zur Stromleitung benutzt und in der im folgenden dargestellten Weise zur Lichtaussendung angeregt.

Zweites Kapitel

Vom Wesen der Gasentladung und ihren Erscheinungsformen

Die heute technisch hauptsächlich interessierende Art der Anregung geordneter Strahlung ist die durch Elektronenstoß, wie sie bei den elektrischen Gasentladungslampen vorliegt.

Voraussetzung für die Möglichkeit der Elektrizitätsleitung in einem Gase ist zunächst das Vorhandensein einer gewissen, wenn auch kleinen Anzahl von freien Elektronen — das sind negativ elektrische Elementarladungen — wie sie z. B. als Wirkung der radioaktiven Strahlung oder der Höhenstrahlung als überall vorhanden angenommen werden können. Wird an die Stromzuführungen, an die Elektroden, eines Entladungsrohres eine Spannung angelegt, so werden die Elektronen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes beschleunigt zu der positiven Elektrode, der Anode, hinwandern und somit einen, wenn auch geringfügigen Ladungstransport längs der Entladungstrecke vornehmen.

Auf ihrem Wege zur Anode werden die Elektronen im elektrischen Felde beschleunigt und stoßen auf Gasatome. Die Gasatome bestehen aus einem positiv elektrisch geladenen Kern, um den sich

je nach Art des Gases eine mehr oder weniger ausgedehnte und dichte Wolke von negativ geladenen Teilchen, also Elektronen, die wir im folgenden zur besseren Unterscheidung „Atomelektronen“ nennen wollen, befindet, und zwar derart, daß das Ganze nach außen hin ungeladen ist. Prallt ein Elektron auf seinem Wege zur Anode auf ein solches Atom, so werden dadurch Störungen und sogar Änderungen innerhalb des Atomaufbaues eintreten, und zwar verschieden, je nach Größe der Geschwindigkeit des stoßenden Elektrons.

Im wesentlichen kann man bei diesen Vorgängen drei verschiedene Fälle unterscheiden, die für die hier zu betrachtenden Erscheinungen von Wichtigkeit sind.

Fall 1. Die Geschwindigkeit des aufprallenden Elektrons ist verhältnismäßig klein. — Das Elektron wird in diesem Fall von dem Atom elastisch reflektiert und ein dabei auftretender „Reflexionsverlust“ setzt sich in Wärme um (s. S. 41 u. 73). — Wir können uns diese Vorgänge in einfacher Weise veranschaulichen: Das Atom ist gleichsam ein Klumpen Gelee mit einem festen Kern im Innern. Solange die Geschwindigkeit des aufprallenden Elektrons klein ist, tritt keine bleibende Gestaltsänderung des Gelees ein, sondern das Elektron wird höchstens aus seiner Bahn abgelenkt.

Fall 2. Die Geschwindigkeit des Elektrons hat einen bestimmten Mindestbetrag. — Das Elektron wird in diesem Fall eine gewisse Energie, die dem Mindestbetrag seiner Geschwindigkeit entspricht, an das Atom abgeben, das Atom wird „angeregt“. Der Mindestwert der Spannung, der notwendig ist, um das Elektron auf diese Geschwindigkeit zu beschleunigen, heißt „Anregungsspannung“. — In unserem Modell bedeutet dies, daß das Elektron eine Veränderung des Geleeklumpens hervorruft, und zwar wird der Geleeklumpen entweder auf Kosten der Energie des Elektrons ausgedehnt, oder in eine andere Form, z. B. aus der Kugelform in die Form eines Ringwulstes übergeführt. Da diese Form aber nicht beständig oder, wie man sagt, stabil ist, hat das Atom das Bestreben, seine ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen. Hierbei wird die aufgenommene Energie wieder frei und in Form von Licht abgestrahlt. Das Atom in seiner veränderten Form verhält sich wie ein aufgeblasener Gummiball, aus dem die Luft, wenn sich die Hülle zusammenziehen kann, herausgepreßt wird.

Fall 3. Die Geschwindigkeit des aufprallenden Elektrons ist größer als ein bestimmter Mindestbetrag, der aber von dem unter Fall 2 erwähnten Betrage verschieden ist. Das Elektron wird in diesem Fall so viel seiner Energie an das Atom abgeben, daß ein Atomelektron vollkommen aus dem Atomverband gelöst wird. Der verbleibende Atomrest, das sogenannte „Ion“, ist durch die nunmehr überwiegende Kernladung positiv geladen und wird demzufolge zur negativen Elektrode, der Kathode, wandern. Man bezeichnet diesen ganzen Vorgang als „Ionisation“ in diesem besonderen Fall als „Stoßionisation“ und den Mindestwert der Spannung, der notwendig ist, um das Elektron auf diese Geschwindigkeit zu beschleunigen, als „Ionisierungsspannung“. Die sogenannte Stoßionisation liefert also neue Ladungsträger, und zwar sowohl freie Elektronen als auch positive Ionen; dieser Vorgang ist bei höheren Stromstärken von ausschlaggebender Bedeutung. In unserm Vergleich bedeutet dies, daß die Energie des aufprallenden Elektrons ausreicht, den Geleekumpen, der sich nicht beliebig ausdehnen oder verformen läßt, zu zerreißen.

Wie kommt also bei Anlegung einer Spannung an die Elektroden eines Entladungsrohres eine elektrische Leitfähigkeit des Gases, eine sogenannte Gasentladung mit den bekannten Leuchterscheinungen zustande? Wie schon erwähnt, bewegen sich zunächst die im Gase vorhandenen Elektronen (s. S. 10) zur Anode hin. Die Stromstärke dieses Ladungstransportes ist bei der geringen Zahl der anfänglich vorhandenen Elektronen sehr klein, sie wird aber von dem Augenblick an sehr rasch ansteigen, von dem die Elektronen durch die erhaltene Beschleunigung auf die Gasatome durch Stoß ionisierend wirken können (Elektronenlawine). Nun bewegen sich aber die Elektronen im elektrischen Felde entsprechend dem Verhältnis der Massen etwa hundertmal schneller als die Ionen, so daß die Elektronen in viel kürzerer Zeit den Weg zur Anode zurücklegen werden, als die Ionen zur Kathode hinwandern. Es tritt also eine Verarmung an Elektronen in dem Raum zwischen Anode und Kathode ein, und es wird sich daher eine sogenannte „positive Raumladung“ zwischen den Elektroden ausbilden. Diese positive Raumladung bewirkt ein stärkeres Spannungsgefälle nach der Kathode hin und schafft durch Beschleunigung der Elektronen für diese besonders

günstige Ionisierungsverhältnisse in der Nähe der Kathode, so daß sich die Raumladung nach einiger Zeit immer dichter an die Kathode heranschiebt. Schließlich werden die Ionen aus der Raumladungswolke auf die Kathode aufprallen. Durch dieses Ionenbombardement werden aber neue Elektronen, und zwar in großer Anzahl aus dem Kathodenmaterial herausgeschlagen, und die Entladung ist nicht mehr allein auf die freien Elektronen im Raum angewiesen, sondern schafft sich sozusagen die erforderlichen Elektronen selbst: das Rohr hat „gezündet“.

Diese Erscheinung tritt stets bei einer für jedes Entladungsrohr eigentümlichen Spannung, der sogenannten „Zündspannung“, ein. Die Höhe der Zündspannung ist im wesentlichen durch die Abmessungen des Rohres und durch die Natur des Füllgases bestimmt. Es findet nämlich eine Art Wechselspiel statt. Einerseits müssen die Elektronen auf ihrem Wege zur Anode auf eine genügende Zahl von Atomen stoßen, um in ausreichender Weise ionenbildend zu wirken. Andererseits müssen die Elektronen aber auch Gelegenheit haben, verhältnismäßig weite Wege zurücklegen zu können, um eine genügend große Geschwindigkeit zu erlangen, sie dürfen also nicht zu viel Zusammenstöße, bei denen sie, ohne zu ionisieren, Energie abgeben (siehe Fall 2, S. 11), erleiden. Bei ungünstigen Ionisierungsbedingungen wird man daher sehr hohe Spannungen an das Rohr anlegen müssen, um die Zündung zu erreichen, und es wird für jedes Entladungsrohr einen günstigsten Fülldruck ergeben, bei dem die Zündspannung am kleinsten ist. Bei gleichen Rohrabmessungen ist neben dem Druck die Art des Füllgases ausschlaggebend. Erfahrungsgemäß verhalten sich die Edelgase am günstigsten, sie haben die kleinste Zündspannung.

Betrachten wir nun den Spannungsverlauf längs einer Gasentladungsstrecke, die sich nach der Zündung in dem beschriebenen beständigen Zustande befindet. Die in diesem Zustande vorhandene Spannungsdifferenz an der Röhre bezeichnet man als „Brennspannung“. Der Spannungsverlauf ist hierbei nicht, wie bei einem festen metallischen Leiter, gleichmäßig, sondern ist im wesentlichen auf drei verschiedene Zonen ungleichmäßig verteilt. Die starke Anhäufung der Elektronen an der Anode und der Ionen an der Kathode bedingt die Ausbildung starker elektrischer Felder an den Elektroden,

also große Spannungsdifferenzen unmittelbar vor Anode und Kathode, die Ursache des sogenannten Anoden- und Kathodenfalles (Abb. 10). Denn, wie oben erwähnt, müssen die Ionen beim Aufprall auf die Kathode aus dieser neue Elektronen herausschlagen, um die Entladung aufrechtzuerhalten, und es herrscht demzufolge, da die Ionen zur Elektronenauslösung eine gewisse Geschwindigkeit besitzen müssen, zwischen der Raumladung der Ionenwolke und der Kathode ein starker Spannungsabfall, der Kathodenfall, in dem die Ionen auf die erforderliche Geschwindigkeit beschleunigt werden.

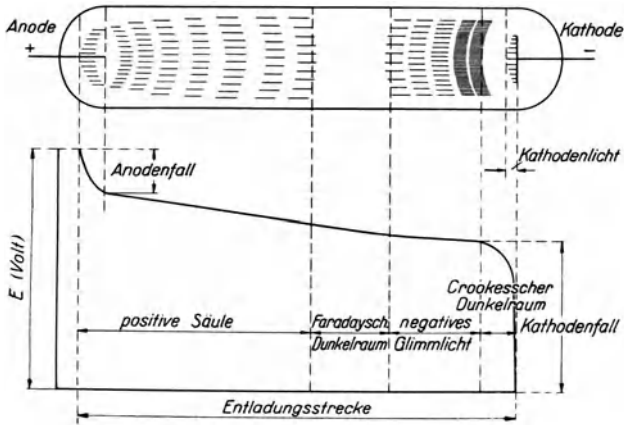


Abb. 10. Lichterscheinungen und Spannungsverlauf in einer Gasentladungsröhre

Die Größe des Kathodenfalles ist dabei von der Art der Ionen (Gasfüllung) und von dem Kathodenmaterial abhängig. Bei Entladungsröhren mit kleinem Elektrodenabstand (z. B. bei 2 cm Rohrdurchmesser ein Abstand von wenigen Millimetern) bestimmt der Wert des Kathodenfalles fast ausschließlich die zum Betrieb der Röhre notwendige Spannung; er beträgt einige hundert Volt. Da die im Kathodenfall verbrauchte Leistung, die sich als Produkt aus Spannung und Stromstärke ergibt — also nach dem oben Gesagten praktisch die ganze für den Betrieb der Röhre aufzuwendende Leistung — nur zum geringsten Teil zur Elektronenauslösung, also nutzbringend verwandt wird, war das Streben der Röhrentechnik darauf gerichtet, diesen Kathodenfall möglichst zu verkleinern oder ganz zu vermeiden.

Wie dieses Ziel bei den modernen Hochleistungsröhren erreicht wurde, so daß diese bei Netzspannung betrieben werden können, wird in dem folgenden Kapitel gezeigt werden.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse beim Anodenfall, für den sich allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten bisher nicht aufstellen ließen. Die Erscheinung kommt dadurch zustande, daß die sich an der Anode anhäufenden Elektronen gleichsam eine Schicht bilden, die dem Elektronenstrom auf die Anode einen gewissen Widerstand entgegengesetzt, die Anode also sozusagen gegen die Elektronen abschirmt.

Sowohl Kathoden- als auch Anodenfall sind, wie nach dem Vorhergehenden verständlich (Fall 2, S. 11), von Lichterscheinungen begleitet. Das Kathodenlicht oder, wie man auch sagt, das „negative Glimmlicht“ ist technisch in den Glimmlampen ausgenutzt worden (s. S. 22 und 25), während das anodische Leuchten in der Schicht vor der Anode bisher wohl keine technische Verwendung gefunden hat; in der altbekannten Bogenlampe wird der Anodenfall zur Erzeugung der hohen Temperaturen des positiven Kraters benutzt. Räumlich zwischen den Leuchterscheinungen an den Elektroden liegt die heute technisch am meisten interessierende Leuchterscheinung, die sogenannte „positive Säule“ (Abb. 10), der Lichtträger der meisten Gasentladungslampen.

Eine leuchtende positive Säule bildet sich aus, wenn die Elektronen bis zur Anregungsgeschwindigkeit beschleunigt werden. Hierbei ist für die Lichtanregung wichtig, daß die mittlere Geschwindigkeit nicht sehr groß ist (Fall 2, S. 11), daß aber die Elektronen durch vielfache Reflexion gezwungen werden, sehr große Wege zurückzulegen — ungefähr das Hundertfache des Elektrodenabstandes — weil dadurch die Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen mit Anregung sehr groß wird (s. Metallampfröhren S. 43); dies erreicht man durch passende Wahl des Röhrenquerschnittes, des Elektrodenabstandes und des Gasdruckes.

Für den Betrieb von Gasentladungsröhren ist ferner wichtig, daß sie stets mit einem Vorschaltwiderstand betrieben werden müssen. Eine Leuchtröhre verhält sich nämlich grundsätzlich anders als z. B. eine Glühlampe. Der Leuchtdraht einer Glühlampe hat eine sogenannte „positive Charakteristik“, d. h. er besitzt einen be-

stimmten Widerstand, der nach dem Ohmschen Gesetz (Spannung = Stromstärke \times Widerstand) bei gegebener Spannung eine ganz bestimmte Stromstärke liefert. Bei Gasentladungsröhren, in denen die positive Säule zur Lichterzeugung benutzt wird, nimmt dagegen im allgemeinen der Widerstand mit wachsender Stromstärke ab, die Gasentladungsröhren haben eine „negative Charakteristik“ (Abb. 11), so daß bei gegebener Spannung kein bestimmter Wert der Stromstärke erreicht wird, sondern die Stromstärke so große Werte annehmen kann, daß eine Zerstörung des Rohres erfolgt.

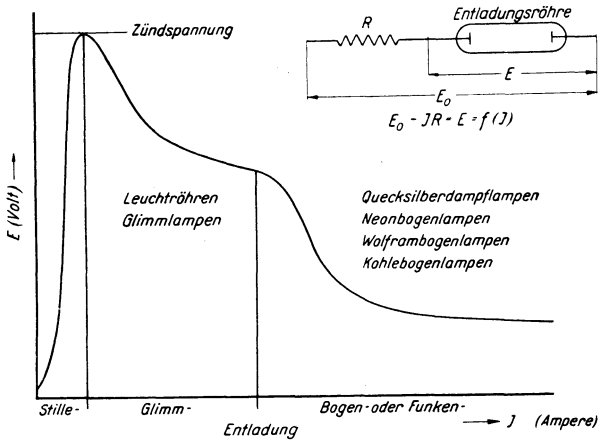


Abb. 11. Charakteristik einer Gasentladung unter verschiedenen Betriebsbedingungen

Der genannte Vorschaltwiderstand bewirkt nun, daß die Spannung an der Röhre in demselben Maße abnimmt wie ihr Widerstand, so daß sich je nach Wahl der Größe des Vorschaltwiderstandes die geeignetste Stromstärke einstellen läßt. Die in diesem Widerstand verbrauchte Energie geht naturgemäß verloren. Bei Wechselstrom, auf dessen Anwendung bei Besprechung der Hochleistungsröhren näher eingegangen wird, kann man den Vorschaltwiderstand durch eine Drossel ersetzen, so daß die Strombegrenzung „wattlos“ erfolgt (s. S. 33ff.).

Die an der Röhre nach erfolgter Zündung vorhandene Spannungsdifferenz war als „Brennspannung“ bezeichnet worden (vgl. S. 13). Wie aus dem Gesagten hervorgeht, ist die zur Aufrechterhaltung des

fortlaufenden Betriebes notwendige Spannungsdifferenz, die sogenannte „Betriebsspannung“, um den Betrag des Spannungsabfalles im Vorschaltwiderstand größer als die Brennspannung. Beim Betrieb der Röhren mit Wechselstrom ist ferner zu beachten, daß es sich nicht wie beim Gleichstrom um eine einmalige Zündung handelt, sondern die Entladung nach jeder Halbperiode abreißt, also auch wieder neu gezündet werden muß (s. S. 33). In diesem Falle liegt also die Betriebsspannung auch noch um diesen Betrag höher als die Brennspannung, ist also höher als beim Betrieb mit Gleichstrom. Die Verteilung der Brennspannung im Rohr erfolgt schließlich, wie bereits erwähnt, auf Anodenfall, Kathodenfall und positive Säule (Abb. 10).

Außer der bisher betrachteten, das Entladungsrohr gleichmäßig erfüllenden Form der positiven Säule müssen noch einige besondere Entladungserscheinungen¹⁾ erwähnt werden, nämlich die sogenannte „kontrahierte Säule“, die „Schlauchentladung“, sowie eine Gruppe von Erscheinungen, die sich unter dem Sammelbegriff der „periodisch verlaufenden Entladungen“ zusammenfassen lassen.

Bei höheren Drucken zieht sich, wie besonders bei Metallen beobachtet wird, die positive Säule auf der Achse der Entladung zusammen. Es ist dies aller Wahrscheinlichkeit nach ein thermischer Effekt, der durch die nach der Achse hin wachsenden Temperatur der Säule hervorgerufen wird. Die Änderung der Temperatur des Gases hat eine Änderung der Dichte zur Folge und dementsprechend eine von der Achse nach der Wand zu abnehmende Bahngeschwindigkeit der Elektronen, so daß die Anregung der Atome ebenfalls abnimmt; optisch äußert sich dies in einer Kontraktion der leuchtenden Säule. Die in der kontrahierten Säule auftretenden Temperaturen sollen beträchtlich sein (man nimmt bei Quecksilberdampf von 1 at 10000^o an), es ist deshalb nicht ausgeschlossen, daß in der Achse schon eine Temperaturanregung stattfindet.

Bei Anwesenheit von Verunreinigungen (Öle, Fette, Naphthalin) tritt in einem kritischen Druckbereich der Verunreinigung eine andere Art der Kontraktion der Säule, die sogenannte „Schlauchentladung“

¹⁾ Das Folgende ist der Vollständigkeit wegen hier angeführt, setzt aber Kenntnis des in „Anhang“ ausgeführten voraus.

ein, bei der die Säule schlangenförmige Bewegungen ausführt. Die Ursache dieser Erscheinungen ist nicht bekannt. Hiermit hängt aller Wahrscheinlichkeit nach die axiale Entmischung in der Säule zusammen, wie man sie bei Gasgemischen beobachtet, die sich in Richtung senkrecht zur Achse entmischen. Besonders auffallend tritt dies bei Molekülgasen auf. In der Achse dissoziieren die Moleküle, wandern nach außen, rekombinieren und reichern sich daselbst an.

Von den periodischen Entladungen ist die bekannteste Erscheinung die der „wandernden Schichten“.

Die Bewegung der Schichten kann unter Umständen so schnell vor sich gehen, daß das Auge eine vollkommen gleichmäßig leuchtende Säule (ein homogenes Plasma, s. S. 81) sieht. Solche wandernden Schichten treten besonders häufig bei Entladungen in Wasserstoff oder in Edelgasen auf. Bei reinen Metallen sind sie bisher nicht beobachtet worden.

Damit sind die wesentlichen physikalischen Grundlagen der elektrischen Gasentladung, wie sie zum Verständnis des Folgenden benötigt werden, dargestellt, und es soll nunmehr die Entwicklung der Gasentladungslampen betrachtet werden. (Eine ausführliche Darstellung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Elementen einer Gasentladung befindet sich im Anhang.)

Drittes Kapitel

Die Entwicklung der Gasentladungslampen

Die älteste Art, elektrische Energie in Lichtenergie umzusetzen, ist die Ausnutzung der Leuchterscheinungen, wie sie beim Stromdurchgang in verdünnten Gasen auftreten. Bereits im Jahre 1742 beobachtete Christian Winkler (Abb. 12), daß in einem ausgepumpten Rohr, in dem sich ein Tropfen Quecksilber befand, eine Lichterscheinung auftrat, wenn er an die im Rohr eingeschmolzenen Stromzuführungen mit Hilfe einer Influenzmaschine eine genügend hohe Spannung anlegte. Diese Röhren wurden später von Geissler weiter entwickelt zu der noch heute für die verschiedensten Versuchszwecke allgemein bekannten Geissleröhre. Für praktische Beleuchtungszwecke sind allerdings diese Röhren nicht verwendbar, da sie nach kurzer Zeit hart werden, d. h. es findet unter Mitwirkung

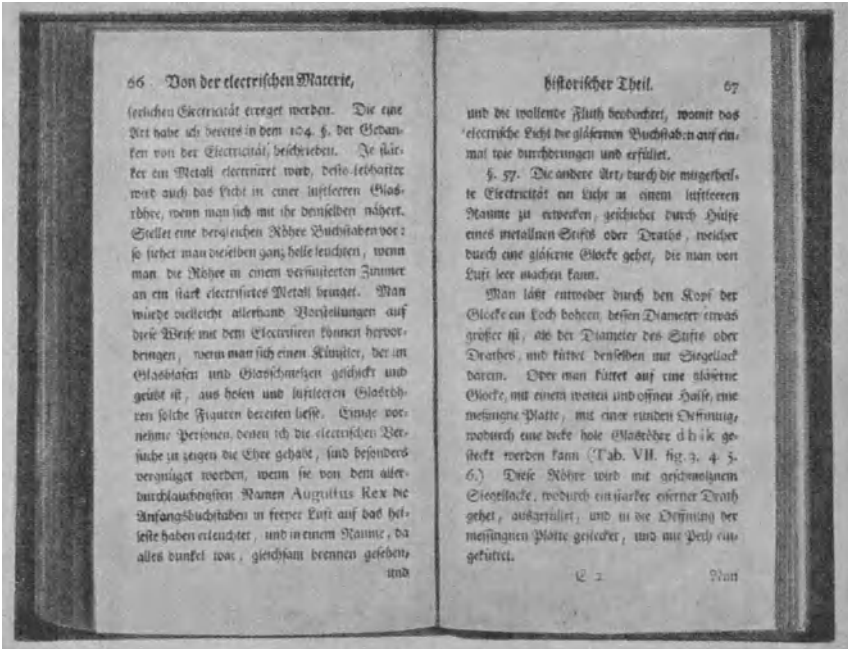


Abb. 12. Beschreibung einer Quecksilberröhre in „Gedanken von den Eigenschaften der Elektrizität“ von Johann Heinrich Winkler, Leipzig 1744

der Zerstäubungsprodukte der Elektroden eine Anlagerung des Füllgases an den Gefäßwandungen statt, wodurch der Verdünnungsgrad des Füllgases so stark herabgesetzt wird, daß die Röhren zunächst anfangen zu flackern und schließlich ganz erlöschen. Praktische Verwendung konnten daher diese Röhren erst finden, nachdem es Moore gelungen war, ein sogenanntes Atemventil (Abb. 13 und 14) anzugeben, durch das eine bei geringer werdendem Fülldruck automatisch einsetzende Nachfüllung des Entladungsrohres stattfindet. Später hat man das ursprüngliche Atemventil durch eine betriebssichere und einfachere Einrichtung ersetzt, die mit einem durch den Entladungsstrom geheizten Bimetallstreifen als Ventilklappe eines Vorratsgefäßes arbeitet. Bei den sogenannten „Tageslichtröhren“ mit Kohlensäurefüllung arbeitet man mit einer besonderen Nachfüllvorrichtung, die auf der chemischen Zersetzung von Magnesium-

carbonat beruht. Der Entladungsstrom betätigt hier eine Schaltungsvorrichtung zur Aufheizung des Magnesiumcarbonats. Diese Moore-Leuchtröhren sind auch heute noch bekannt, und zwar in zwei Aus-

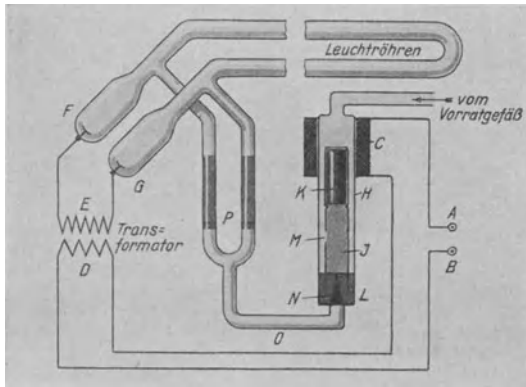


Abb. 13. Moore-Lichtanlage mit Atemventil älterer Ausführung
A und *B* = Netzanschluß, *C* = Spule, *D* = Primärwicklung, *E* = Sekundärwicklung, *F* und *G* = Elektroden, *H* = Ventil-
 mantel, *J* = Glasschwimmer (innen hohl), *K* = Eisenkern, *L* = Quecksilber, *M* = Öffnung im Schwimmer, *N* = Poröser
 Kohlekegel, *O* = Zuleitungsrohr. *P* = Sandstopfen zur Ver-
 meidung von Kurzschluß

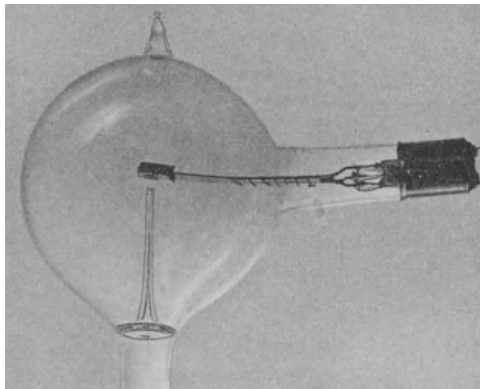


Abb. 14. Neues Ventil nach Becker-Pirani

führungen, einmal mit Stickstoff als Füllgas, wobei sie ein rötlich-gelbes Licht aussenden; und zum andern die sogenannten Tageslichtröhren, deren Kohlendioxydfüllung ein vollkommen tageslicht-

ähnliches Licht ergibt. Gelegentlich hat man auch, z. B. bei der Sterilisierung von Wasser, von Moore-Leuchtröhren mit Wasserstoff-füllung Gebrauch gemacht.

Der nächste Schritt in der Entwicklung war der zu den Edelgas-leuchtröhren. Wählt man als Füllgas ein Edelgas, z. B. Neon oder Helium, so kann man bei passend gewähltem Fülldruck auf das Atemventil verzichten, da diese Röhren während einer Betriebszeit von einigen tausend Stunden nicht hart werden. Solche Edelgas-leuchtröhren haben heute in der Reklamebeleuchtung starken Eingang gefunden, vor allem die Neonröhren. Eine reine Neonfüllung gibt ein sattes rotes Licht. Wählt man einen Quecksilberzusatz, so wird das Quecksilber verdampfen und man erhält, da das Quecksilber eine erheblich geringere Anregungsspannung hat als Neon (Abb. 54), die charakteristische blaue Strahlung des Quecksilberspektrums. Schließt man diese Röhren in orangefarbenem oder grünem Glas ein, so erhält man ein grünes Licht, da von beiden Farbläsern die blauen Linien verschluckt werden. Diese drei Arten sind heute hauptsächlich in Anwendung. Je nach Rohrlänge und Rohrweite erfordern sie eine Spannung von 1500 bis 25000 V, wobei man bei handelsüblichem Durchmesser von 15 mm gewöhnlich mit einer Spannung von 1000 V je 1 m Rohrlänge rechnet. Da ihre Leuchtdichte sehr klein ist (einige Zehntel HK/cm²), sind sie für allgemeine Beleuchtungszwecke ungeeignet, da man sehr große Rohrlängen anwenden müßte. Die Lichtausbeute schwankt je nach Wahl des Füllgases zwischen 4 und 25 Lm/W. Die Nutzbrenndauer beträgt etwa 2000 Stunden.

Die Notwendigkeit, bei all diesen Röhren stets Hochspannung verwenden zu müssen und ferner, um ausreichende Lichtwirkung zu erzielen, mit großen Rohrlängen zu arbeiten, die meist das Zusammenschmelzen der Rohrstücke am Ort der Installation notwendig macht, drängte naturgemäß zu der Untersuchung, ob es nicht möglich sei, diese Mängel zu beheben, also Gasentladungsröhren, die bei Netzspannung betrieben werden können, und die eine hohe Leuchtdichte bei guter Lichtausbeute besitzen, herzustellen.

Der nächstliegende Gedanke, die Leuchtdichte dadurch zu steigern, daß man kleine Rohrdurchmesser verwandte, ließ sich nicht verwirklichen, da dann eine so starke Erwärmung auftritt, daß das

Glas wegschmilzt. Um die Lampen bei Netzspannung betreiben zu können, hat man ferner versucht, die positive Lichtsäule vollkommen zu unterdrücken, um so auch den Spannungsabfall in der positiven Säule zu vermeiden. Dieser Weg führte zu einem gewissen Ziel. Durch Wahl eines geeigneten Füllgases (ein Edelgasgemisch von etwa 75% Neon und etwa 25% Helium bei einem Druck von etwa 15 mm Hg) gelingt es, durch starke Annäherung der Elektroden bis auf einen Abstand von wenigen Millimetern die positive Säule und damit auch den in ihr vorhandenen Spannungsabfall vollkommen zu unterdrücken.

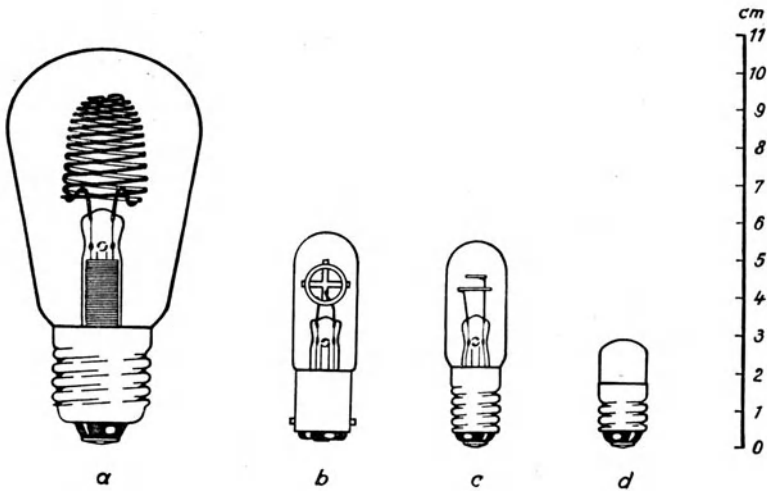


Abb. 15. Verschiedene Ausführungsformen von Glimmlampen
 a = „Bienenkorb“-Lampe, b = Spannungssucherlampe, c = Signalglimmlampe,
 d = Zwergglimmlampe

Da ferner die Stromstärke sehr klein ist — etwa 0,02 bis 0,03 A —, ist auch der Anodenfall, der ja im wesentlichen nur von der Stromstärke abhängt, sehr klein, so daß praktisch nur der Kathodenfall in Frage kommt. Bei diesen Lampen bildet sich auf diese Weise nur das sogenannte „negative Glimmlicht“ aus, eine Lichthaut, die scheinbar die ganze Kathode überzieht (Abb. 10). Auf diese Weise gelangte man schon etwa 1910 zu den Glimmlampen, die eine Zündspannung von etwa 210 V besitzen, also ohne weiteres bei normaler Netzspannung betrieben werden können, und zwar sowohl bei

Gleichstrom als auch bei Wechselstrom. Durch Aufbringung eines stark Elektronen emittierenden Körpers, z. B. Bariumacid, auf die Eisenelektroden gelang es schließlich sogar, den Kathodenfall und damit die Zündspannung soweit zu verringern, daß die Glimmlampen auch bei einer Betriebsspannung von 110 V gebrannt werden können.

Diese Glimmlampen (Abb. 15) haben aber einen so geringen Lichtstrom — nur etwa 1 Lm —, daß sie für allgemeine Beleuchtungszwecke gar keine Bedeutung haben. Jedoch konnten sie sich wegen ihrer besonderen Eigenschaften für mannigfache elektrotechnische Verwendungszwecke — es seien hier nur die Fernsehglimmlampen erwähnt — in erheblichem Maße einführen.

Die Lösung der oben gekennzeichneten Aufgabe gelang schließlich durch Verfolgung eines Weges, der schon um die Jahrhundertwende eingeschlagen worden war, nämlich die Verwendung von Glühelektroden. In der Berliner Physikalischen Gesellschaft hatte Wehnelt im Jahre 1904, also vor fast dreißig Jahren, bereits gezeigt, wie man aus der Kathode ohne erhebliche Energieverluste Elektronen frei machen kann, damit also die Möglichkeit hat, den hohen Kathodenfall mit seinen großen Spannungsverlusten zu vermeiden. Wehnelt benutzte als Kathodenmaterial glühende Oxyde der Erdalkalimetalle (also Calcium, Barium, Strontium) und erzielte mit diesen bei Laboratoriumsversuchen gute Ergebnisse. Die Lebensdauer dieser Wehnelt-Elektroden betrug jedoch höchstens einige Stunden, so daß eine technische Verwendung damals nicht in Frage kam. Die Elektroden nach diesem Prinzip für technisch brauchbare Gasentladungslampen zu verwenden, ist vielmehr erst eine Errungenschaft der neuesten Entwicklung.

Schon Edison hatte im anderen Zusammenhange gefunden, daß alle Körper, wenn sie glühen, mehr oder weniger Elektronen aussenden, und Wehnelt hatte zu Beginn dieses Jahrhunderts auf die Ausnutzung dieser Tatsache für die Herstellung lebensfähiger Elektroden hingewiesen, war aber immer wieder auf die Erdalkalioxyde zurückgekommen. In den letzten drei Jahren ist es nun in den Laboratorien der großen Glühlampenwerke, vor allem der Studiengesellschaft der Osram G. m. b. H. Kommanditgesellschaft, gelungen, geheizte Elektroden anderer Zusammensetzung herzustellen, die eine für technische Verwendungszwecke ausreichende Lebensdauer be-

sitzen. Die Verwendung dieser neuen Glühelektroden hat es ermöglicht, Gasentladungsröhren zu bauen, bei denen der Kathodenfall fast vollständig zum Verschwinden gebracht werden kann, nur noch Bruchteile eines Volts beträgt. Zum Betrieb einer Neon-Entladungsröhre von z. B. 70 cm Länge und 2 cm Durchmesser sind daher bei Verwendung dieser Elektroden nicht mehr wie früher etwa 1000 V erforderlich, sondern nur noch etwa 100 V. Auch die Leuchtdichte und die Lichtausbeute konnten bei diesen Röhren außerordentlich gesteigert werden, so daß das gestellte Problem, Gasentladungsröhren ausreichender Lebensdauer mit hoher Leuchtdichte und guter Lichtausbeute für Netzanschluß zu bauen, damit seine Lösung gefunden hat.

Tabelle III
Zur Geschichte der Gasentladung

I. Die Entladungsformen

a) Erste Beobachtungen

Otto v. Guericke: Glimmlichterscheinungen bei der Reibungselektrizität	1670
Leibnitz: Elektrischer Funke beim Reiben einer glänzenden Schwefelkugel	1672
Picard: Lichterscheinung im Torricellischen Vakuum beim Transport eines Barometers	1675
Gray, Duay u. Nollet unterscheiden als erste Funken, Büschel und Glimmen	1730—1760
Winkler erkannte vor Franklin den Blitz als elektrischen Funken	1746
Eberhard deutete zuerst das Nordlicht als elektrische Erscheinung	1758
Davy: Lichtbogenbildung beim Öffnen von Stromkreisen	1800

b) Klassische Untersuchungen

Faraday: Untersuchungen über Entladungserscheinungen	1838
Plücker: Untersuchungen über Entladungserscheinungen	1858
Hittorf: Umfassende Untersuchungen über Entladungen von 1870 ab, ferner Crookes, Warburg, Goldstein.	

c) Arbeiten der Neuzeit

Stark, Seeliger, Güntherschulze, Hagenbach und viele andere.

II. Die historische Entwicklung der technischen Leuchtröhren

Meinicke: Erste gasentladungstechnische Beleuchtungsanlage mit „Blitztafeln“ und „Vakuumröhren“	1819
Foucault-Bunsen: Erste Anwendung des Lichtbogens zur elektrischen Beleuchtung	1842
Geissler: „Vakuumleuchtröhre“ mit Platinspitzen	1856
Hefner-Alteneck: Differentialbogenlampe	1879
Moore: Leuchtröhren mit Füllungen unedler Gase	1900
Cooper-Hewitt: Quecksilberniederdrucklampe	1901

Mey: Erste Glimmlampe für 110 Volt	1903
Wehnelt: Oxydelektrode	1904
Küch und Retschinsky: Quecksilberhochdruckquarzlampe	1906
Gehlhoff: Anregung von Alkalimetallen in Edelgasen	1911
Schröter, Skaupy und Claude: Gleichstrom-Edelgasröhren	1912
Watson: Glimmlampe mit Neonfüllung	1914
Pirani: Natrium-Lampe mit 70 % Lichtausbeute	1929

III. Grundlegende Arbeiten zur Theorie der Entladung

Wood: Temperaturmessungen in der Entladung	1896
Stark: Theorie der Molisierung und Ionisierung	1901
Townsend: Theorie des Zündvorganges	1901
Hagenbach: Theorie des Lichtbogens	1910
Frack und Hertz: Mechanismus des elastischen und unelastischen Stoßes	1912/13
Bohr: Atommodell und Lichtausstrahlung	1913
Langmuir: Sondenmethode zur Elektronentemperaturmessung.	1923
Schottky: Diffusionstheorie der positiven Säule	1924

Viertes Kapitel

Die Hochleistungsröhren für Netzanschluß

Wie schon erwähnt, ist das bisher einzig technisch brauchbare Verfahren zur Lumineszenzanregung die durch Elektronenstoß erfolgende geordnete Strahlungsanregung bei elektrischen Entladungen in Gasen. „Positive Säule“ und „negatives Glimmlicht“ sind hierbei Träger der Lichterscheinung, wobei der positiven Säule die bei weitem bessere Ökonomie zukommt, so daß für die technische Ausbildung von Lichtquellen fast ausschließlich die positive Säule benutzt wird.

Die Schwierigkeiten, die bisher der Schaffung allgemein verwendungsfähiger Lichtquellen dieser Art entgegenstanden, sind im vorigen Kapitel ausführlich geschildert. — Um die Gasentladungslampen als brauchbare Lichtquellen in die Beleuchtungstechnik einführen zu können, müssen folgende Anforderungen¹⁾ von den Lichtstrahlern erfüllt werden:

1. Die Betriebsspannung der Lampe muß der Netzspannung angepaßt werden;

¹⁾ Die selbstverständliche Forderung nach einer ausreichenden Lebensdauer ist hier nicht angeführt, jedoch haben sich aus dieser viele herstellungstechnische Probleme ergeben, als Beispiel sei hier nur auf die Entwicklung der Alkali-festen Gläser hingewiesen, die überhaupt erst die Herstellung technisch brauchbarer Natrium-Röhren ermöglicht hat.

2. die Leuchtdichte der Lampe muß so groß sein, daß mit kleinen Rohrlängen oder richtiger ausgedrückt, mit kleineren Volumina ausreichende Lichtströme erzeugt werden können;

3. die Ökonomie der Lampen muß der Lichtausbeute der bestehenden Lichtquellen zum mindesten entsprechen, nach Möglichkeit aber gesteigert werden können, und schließlich muß

4. die Lichtfarbe der Lampen dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt werden können.

Welche Fortschritte sind nun in bezug auf diese Anforderungen erreicht worden?

1. Anpassung der Betriebsspannung an die Netzspannung

Um Gasentladungslampen guter Wirtschaftlichkeit zum Betriebe an Netzspannungen, und zwar in Rücksicht auf die in zunehmender Weise erfolgende Umstellung der Gleichstromnetze auf Wechselstrom, für Wechselspannung zu bauen, kommt es in erster Linie darauf an, die für die Entladung notwendigen Elektronen mit mög-

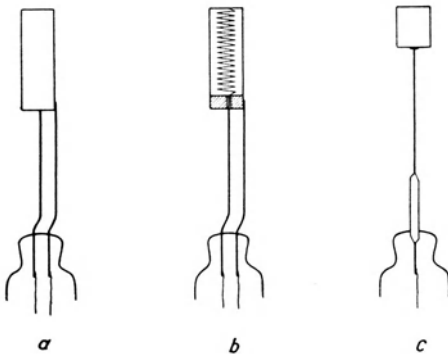


Abb. 16. Schematische Darstellung der amerikanischen Blechtopf- und der deutschen Blockelektrode

glichst geringem Energieaufwand zu liefern, um den Kathodenfall zu vermeiden. Es ist schon ausgeführt worden, daß die Lösung dieser Hauptaufgabe eine Frage der passenden Wahl des Elektrodenmaterials ist; das Prinzip hatte ja schon Wehnelt vor fast dreißig Jahren angegeben, indem er zeigte, wie Elektronen aus Glühkathoden frei gemacht werden.

Der von Wehnelt gewiesene Weg führte über mannigfache technisch wenig brauchbare Zwischenstufen zunächst zur Ausbildung von fremdgeheizten Elektroden. Von den verschiedenen Ausführungsformen, die nach dem Wehnelt-Prinzip im Laufe der letzten Jahre ausgebildet wurden, sind vor allem zwei Elektrodenformen zu

erwähnen, nämlich die amerikanische Blechtopfelektrode mit Innenheizung und die geheizte Blockelektrode der Studiengesellschaft für elektrische Beleuchtung des Osram-Konzerns (Abb. 16). Die amerikanische Elektrodenform eignet sich vornehmlich zur Verwendung als Kathode für Gleichstrombetrieb, da bei Wechselstrom die Elektroden sich in der positiven Phase durch den Anodenfall, in der negativen Phase durch einen punktförmigen Ansatz der Entladung so stark aufheizen, daß sie manchmal schon nach kurzer Zeit zerstört werden. Die mit diesen Elektroden ausgerüsteten Röhren wurden daher zum Anschluß an Wechselstrom meist in einer Art Gleichrichterschaltung unter Verwendung von Röhren mit zwei Anoden betrieben (Abb. 17).

Bei der von Pirani, Ewest und Mitarbeitern entwickelten Blockelektrode der Studiengesellschaft für elektrische Beleuchtung ist dieser Nachteil beseitigt. Sie besteht aus einem Gemisch von schwer schmelzbaren Metallen mit Elektronen emittierenden Stoffen, also z. B. Wolfram und Erdalkalioxyden. Das wesentlich Neue bei diesen Elektroden ist, daß das Oxyd in relativ gutem elektrischen und thermischen Kontakt mit den metallischen Zuführungen steht. Dies erreicht

man in der Weise, daß man ein Gemisch aus einem Metallpulver mit den pulverförmigen Oxyden zusammensintert. Je nach dem Grade der Sintertemperatur erhält man dann mehr oder weniger form- und temperaturbeständige und dichte Sinterkörper. Das zugesetzte schwer schmelzbare Metall hat dabei nicht nur die Aufgabe der erwähnten Stromleitung — das Oxyd wird erst bei höheren Temperaturen leitend — sondern auch gleichzeitig die der Wärme-

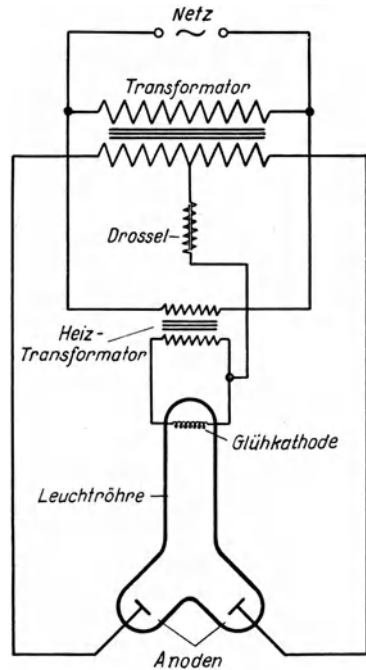


Abb. 17. Alte Gleichstromhochleistungs-
röhre in Gleichrichterschaltung für An-
schluß an Wechselstrom

ableitung vom Oxyd, und schließlich hat es als Unterlage für das aus dem heißen Oxyd sich allmählich ausscheidende Erdalkalimetall zu dienen. Die äußere technische Ausführung dieser Elektroden ist für größere Stromstärken ähnlich wie die der amerikanischen Blechtopfelektroden. Der Sinterkörper ist ein Hohlzylinder, der die Heizwendel enthält und außen mit einem Wolfram- oder Molybdän-Blech-Zylinder oder unter Umständen auch von einer Lage Wolfram-

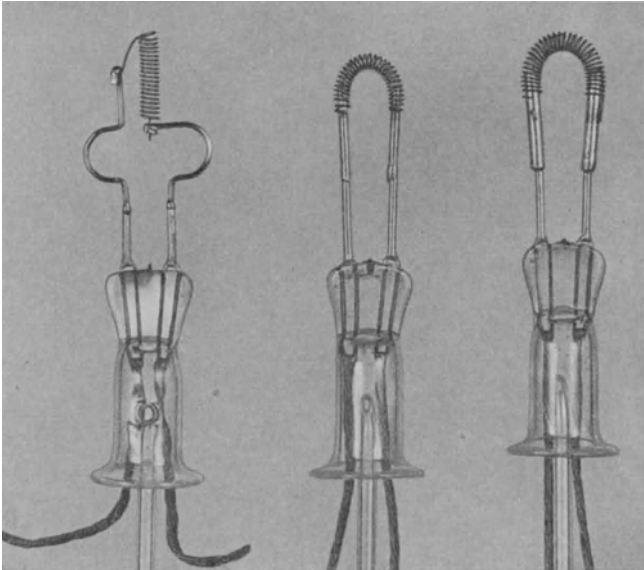


Abb. 18. Oxydelektroden mit Heizwendel für Stromstärken bis 10 A

draht umgeben ist. Diese Schutzwendel kann gleichzeitig als Heizwendel bei kleineren Elektrodenabmessungen dienen (Abb. 18).

Bemerkenswert ist, daß man besonders bei Wechselstrom auf die besondere Heizung der Elektroden ganz verzichten kann, da dann der Anodenfall der vorhergehenden Halbperiode die Elektrode genügend hoch heizt. — Auf den Zündvorgang bei solchen nicht fremdgeheizten Elektroden wird weiter unten eingegangen. — Bei Gleichstrom kann man unter Umständen auf Fremdheizung ebenfalls verzichten, jedoch muß man, damit die Elektroden genügend heiß bleiben, einen Wärmeschutz anbringen.

Bei Verwendung von genügend hoch geheizten Glühelektroden geht der Kathodenfall bis auf einige zehntel Volt zurück, so daß dadurch die Betriebsspannung, die bei den bisher bekannten handelsüblichen Röhren von etwa 20 mm Durchmesser mit kalten Elektroden für ein 1-Meter-Rohr etwa 1000 V beträgt, auf etwa 100 V sinkt; die Röhren sind also für die gebräuchlichen Netzspannungen zu verwenden. Man kann die Elektrode in der gleichen Weise auch als Anode verwenden, ohne daß die Aufheizung übermäßig wird, d. h. das Rohr auch bei Wechselstrom betreiben. Derartige Elektroden sind in den verschiedensten Ausführungsformen entwickelt worden (Abb. 19). Damit ist die Aufgabe der Anpassung der Betriebs-

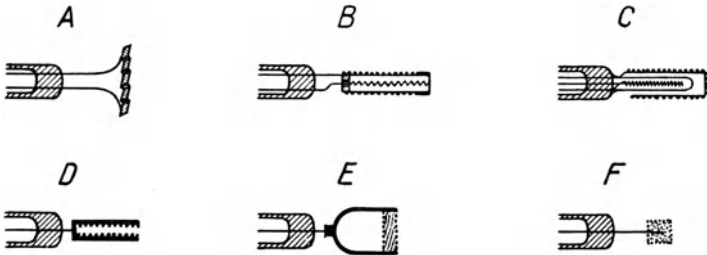


Abb. 19. Verschiedene Formen von Oxydelektroden mit (A, B, C) und ohne (D, E, F) Fremdheizung

spannung der Röhren an die Netzspannung und gleichzeitig auch des Betriebes an Wechselstrom gelöst.

Was haben nun diese neuen Glühelektroden an der Entladung geändert? Ehe wir zur Behandlung dieser Frage übergehen, müssen wir jedoch noch im einzelnen den schon erwähnten Zündvorgang behandeln und daran anschließend die für den Betrieb der Röhren notwendigen Vorrichtungen und Schaltungen beschreiben.

Für den Betrieb solcher Röhren ist kennzeichnend, daß der Widerstand einer Gasentladung im kalten Zustande so groß ist, daß sie bei Netzspannung nicht zündet. Es sind daher zur Einleitung der selbständigen Entladung meist gewisse Zündvorrichtungen notwendig.

Unter „Zündung“ einer Gasentladung versteht man, wie schon ausgeführt, die Einleitung der Entladung. Die Elementarprozesse, die hierbei eine Rolle spielen, sind ebenfalls bereits geschildert. Danach tritt die Zündung bei einer bestimmten kleinsten Spannung,

der Zündspannung, ein, die ihrerseits vom Elektrodenabstand, von der Art und dem Druck des Füllgases, von der Beschaffenheit der Kathode und von dem Ionisationszustand des Rohrrinnern vor der Zündung abhängen. Alle diese Faktoren sind durch die Konstruktionsdaten des Rohres bestimmt, mit Ausnahme des zuletzt genannten Ionisationszustandes.

Die Zündspannung wächst mit dem Elektrodenabstand; sie ist bei Edelgasen kleiner als bei unedlen (s. S. 13); sie nimmt zunächst mit wachsendem Druck ab, erreicht bei etwa $\frac{1}{10}$ bis 1 mm Hg ein Minimum, um dann wieder anzusteigen. Die Beschaffenheit der Kathode äußert sich darin, daß bei kalter Kathode die Zündspannung um den Betrag des normalen Kathodenfalles größer sein muß als bei geheizter, also thermisch emittierender Elektrode.

Dieser Umstand spielt eine Rolle bei der Zündung mit nicht fremdgeheizten Oxylektroden.

Um beim Einschalten der Röhre eine Einleitung der Emission der Elektrode herbeizuführen, kommt es nur darauf an, die Elektrode teilweise oder im ganzen auf eine solche Temperatur zu bringen, daß die Emission einsetzen kann. Dies kann man nun z. B. auf folgende Weise erreichen:

Man bringt in unmittelbare Nähe der Kathode einen mit der Stromzuführung verbundenen Leiter geringer Oberfläche, indem man etwa einen Draht um die Elektrode wickelt oder einen Blechmantel geeigneter Abmessung herumlegt. Wird nun die Röhre an Spannung gelegt, so setzt die Entladung zunächst an diesen Leiterenden an. Da die Leiter von früher her aktiviert, d. h. mit einem Überzug von Erdalkali versehen sind, tritt nur ein verhältnismäßig kleiner Kathodenfall auf, und die Entladung kommt bereits bei Netzspannung zustande. Infolge der hohen spezifischen Belastung erwärmt sich aber der Leiter sehr stark und heizt damit den Oxydblock der Elektrode auf, so daß diese ebenfalls zu emittieren anfängt und die Entladung auch an ihm einsetzt. Man kann also auf diese Weise Leuchtröhren mit stark emittierenden Elektroden ohne Fremdheizung in Betrieb bringen.

Der Ionisationszustand, die sogenannte „Restionisation“ der Gasfüllung ist gewissen Zufälligkeiten unterworfen und hat deshalb in gewisser Hinsicht zu technischen Schwierigkeiten geführt. Nach dem oben Gesagten ist zum Aufbau einer Entladung eine gewisse Mindestzahl freier Elektronen erforderlich. Unter Umständen tritt aber eine Verarmung des Volumens an freien Elektronen dadurch ein, daß sich die Wandungen des Rohres aufladen, also Ladungsträger aus dem Volumen herausgezogen werden (eine ähnliche Wirkung rufen auch die sogenannten elektronegativen Gase, wie z. B. Sauerstoff, hervor, die freie Elektronen anlagern können). Dies macht

sich naturgemäß bei langen Röhren, also großem Elektrodenabstand stärker bemerkbar als bei kleinem Elektrodenabstand.

Um diese Schwierigkeit zu überwinden, hat man verschiedene Vorkehrungen getroffen. Man kann z. B. die Entladungsstrecke durch eine eingeleitete Hilfsentladung ionisieren und hat zu diesem Zweck technisch zwei Methoden

ausgebaut: man verwendet entweder einen kleinen Hochfrequenzapparat und stellt die Hilfsentladung mittels Außenelektroden her, wobei die Schaltung zweckmäßig so gewählt wird, daß sich der Hochfrequenzapparat beim Absinken der Zündspannung auf die Brennspannung automatisch abschaltet (Abb. 20), oder aber man legt in das Innere der Röhre eine Hilfsentladung zwischen zwei dicht beieinander stehenden Elektroden, die über einen hohen Widerstand mit den Hauptelektroden verbunden sind (Abb. 21). Die Hilfsentladung, die mit Sicherheit zwischen den Hilfselektroden einsetzt, sorgt dann für eine Vorionisation des Rohrrinnern.

(Der durch die Hilfsentladung fließende Strom beträgt größenordnungsmäßig einige zehntel Milliampere, so daß er für die Stromkosten der Röhre nicht ins Gewicht fällt.)

Ein anderer Weg, eine sichere Zündung zu gewährleisten, ist der, daß man die Wandladungen durch einen leitenden Überzug

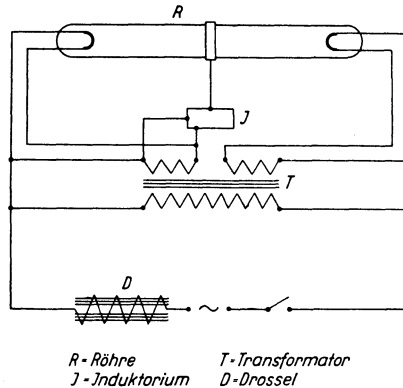


Abb. 20. Schaltskizze für Betrieb und Zündung einer Hochleistungsleuchtröhre mit Hilfe von Hochfrequenzentladung und Außenelektroden

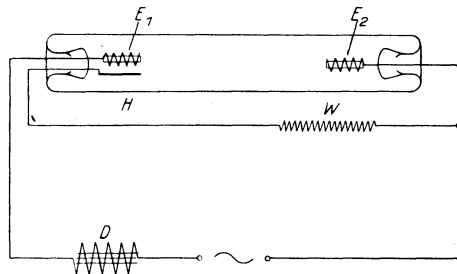


Abb. 21. Schaltskizze für Betrieb und Zündung einer Hochleistungsleuchtröhre durch Hilfsentladung zwischen einer Innelektrode (H) und einer der Hauptelektroden (E_1)

der Wände der Entladungsröhre beseitigt. Hierzu genügt unter Umständen schon die Anbringung eines Längsstreifens an der Röhre¹⁾ aus einem schlecht leitenden Material. Durch solche Maßnahme ist die Zündung von Gasentladungsröhren weitestgehend gesichert.

Bei Röhren, bei denen der Dampfdruck im Betrieb ansteigt [Quecksilber- und Alkalihochdruckröhren (s. S. 44)], ist eine Wiederzündung nach Unterbrechung des Betriebes erst möglich, wenn sich die Röhre abgekühlt hat, da die Zündspannung eines Metaldampfes von etwa 1 at ungefähr in der Größenordnung von 300 V bei 10 cm Elektrodenabstand liegt.

Nach erfolgter Zündung nimmt bei den meisten Gasentladungsröhren die Spannung zwischen den Elektroden mit wachsender Belastung ab. Sie haben eine „negative Charakteristik“ (s. S. 15 und 16); es bedeutet dies, daß sich eine Gasentladungsröhre wesentlich anders als ein Ohmscher Widerstand verhält, bei dem ja die Brennspannung mit der Belastung wächst. Es zeigt sich, daß nach der Zündung des Rohres die Röhrenspannung bei zunehmender Stromstärke abnimmt und sich auf einen konstanten Wert, der durch die Größe des Vorschaltwiderstandes und des inneren Widerstandes des Rohres bestimmt ist, einstellt.

Dieser Vorgang stellt sich folgendermaßen dar: Wenn J die Stromstärke, R den Vorschaltwiderstand, E_R die Klemmenspannung der Röhre und E die Netzspannung bedeuten, so ist

$$R \cdot J + E_R = E,$$

die Größe von E_R ist hierbei durch die Charakteristik bestimmt.

Die Charakteristik ist meist in Form einer Kurve gegeben; man entnimmt aus ihr den Wert von E_R , indem man in diese Kurve die gerade Linie hineinzeichnet, die durch die Gleichung

$$R \cdot J = E - E_Z$$

gegeben ist, worin E_Z die Zündspannung bedeutet, die sich ergibt, wenn man aus der Stromspannungskurve der Röhre den Wert für $J = 0$ extrapoliert. Der Schnitt dieser Geraden mit der Kurve der Charakteristik ergibt dann die Brennspannung (Abb. 22).

Bei der Betrachtung der Charakteristik sieht man sofort, daß mit abnehmender Größe des Vorschaltwiderstandes die Klemmenspannung immer weiter sinkt und die Betriebsstromstärke ansteigt. Bei Verwendung eines zu kleinen Vorwiderstandes können sich also Stromstärken ergeben, denen die Röhre nicht gewachsen ist und infolgedessen zur Zerstörung des Rohres führen (s. S. 16). Die Verwendung eines Vorschaltwiderstandes ist also für Gasentladungsröhren unerlässlich.

¹⁾ Sogenannter „Zündstrich“.

Andererseits bringt jedoch die Verwendung eines Vorschaltwiderstandes eine gewisse nicht zu umgehende Verlustleistung in den Betrieb der Leuchtröhren, die um so höher wird, je größer der Unterschied zwischen Zünd- und Brennspannung ist, d. h. also, je stärker bei einer bestimmten Röhre die Belastung ist. Bei Betrieb mit Wechselstrom hat man eine Möglichkeit, diese Verlustleistung zu vermeiden, indem man die Röhre über eine passende (Eisen-) Drosselspule betreibt. Der Ohmsche Widerstand guter Drosseln

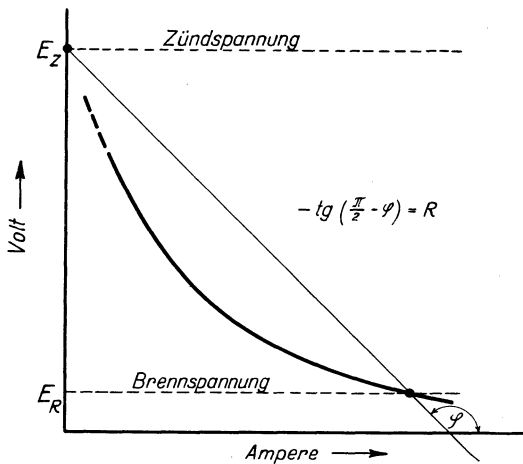


Abb. 22. Graphische Bestimmung der Brennspannung (E_R) einer Gasentladungsröhre an der Charakteristik und der Widerstandsgeraden

(D in Abb. 20) kann sehr klein gemacht werden, so daß die Verlustleistung klein bleibt. Entsprechend lassen sich auch Kondensatoren verwenden (Abb. 23).

Die Verwendung einer Vorschalt-drossel hat gleichzeitig aber noch einen weiteren großen Vorteil: Bei Wechselstrom haben Gasentladungslampen die Neigung zu „flackern“, d. h. gegen Ende jeder Halbperiode erlischt die Lampe, wenn die Netzspannung unter einen bestimmten Wert der sogenannten „Abreißspannung“ gesunken ist, und zündet erst wieder, wenn die Spannung in der nächsten Halbperiode bis auf die Zündspannung angestiegen ist. Die so entstehende Dunkelpause hängt also von der Höhe der Zündspannung der folgen-

den Halbperiode, die stets kleiner als die Zündspannung zu Beginn des Betriebes ist, ab. Infolgedessen ist die Dauer der Dunkelpause bei Röhren hohen Gasdruckes (etwa 30 mm Hg) größer als bei solcher niederen Druckes (etwa 1 bis 5 mm). Bei Verwendung einer Drossel werden nun diese Dunkelpausen erheblich verkleinert.

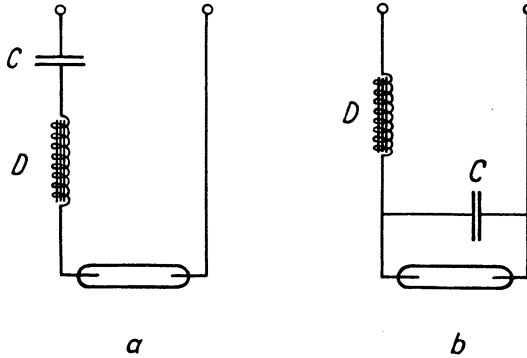


Abb. 23. Schaltungen einer Gasentladungsröhre mit Vorschalt-drossel und Kondensator zum Betrieb von Röhren mit hohen Zündspannungen

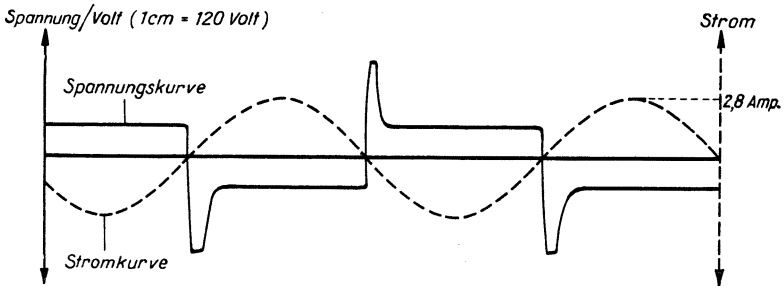


Abb. 24. Strom- und Spannungsverlauf an einer Entladungsröhre (Quecksilber-Hochdruckröhre) bei Verwendung einer Vorschalt-drossel und Kondensator (Schaltung *a* in Abb. 23)

Die Abbildung ist auf die Hälfte verkleinert, so daß sich der Spannungsmaßstab verdoppelt

Aus der Charakteristik der Drossel und der Gasentladung ergibt sich ein wesentlich anderer Spannungsverlauf als bei Verwendung eines Ohmschen Vorschaltwiderstandes (Abb. 24). Während nämlich bei letzterem die Spannung an der Röhre im wesentlichen einen sinusförmigen Anstieg bis zur Zündung hat, hat sie bei einer Drosselspule einen fast rechteckigen Verlauf, so daß die Dunkelpausen wesentlich abgekürzt werden und das physiologisch außerordentlich störende Flackern vermindert wird.

Wie schon erwähnt, lassen sich in der gleichen Weise wie Drosselspulen auch gute verlustfreie Kondensatoren verwenden, allerdings ohne den eben genannten Vorteil der günstigen Spannungskurve. Bei Betrieb mit Drosselspulen und Kondensatoren wird zwar die vom Verbraucher zu tragende Verlustleistung im Vorwiderstand herabgesetzt, dafür aber die Blindlast des Netzes erhöht. Dies kann man dadurch vermeiden, daß man angenähert ebenso viel Watt Leuchtröhrenleistung über Drosseln wie über Kapazitäten entnimmt. Ferner kommt bei Wechselstrombetrieb noch die Eigentümlichkeit der Gasentladungen hinzu, für Wechselströme einen von der Frequenz abhängigen komplexen Widerstand darzustellen. Diese Erscheinung hängt zunächst von dem Verlauf von Strom und Spannung an der Röhre ab, dann aber auch von dem inneren Mechanismus der Gasentladung, wie Anwesenheit metastabiler Zustände, große Lebensdauer und geringe Ionenbeweglichkeit und dergleichen mehr, alles Faktoren, die eine gewisse elektrische Trägheit der Gasentladung bedingen und damit eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Sinne einer Induktivität hervorrufen können. — Die Berechnung der resultierenden Phasenverschiebung aus dem Einsatz der Entladung bei bestimmter Zündspannung gestaltet sich schwierig, da Strom und Spannung an der Röhre nicht sinusförmig verlaufen und man daher auf Obertonanalyse zurückgehen muß. Resultierend kommt bei normalen Röhren ein Leistungsfaktor von etwa 0,95 heraus. Hiervon ist jedoch der obenerwähnte Einfluß einer Drossel wohl zu unterscheiden, bei der sich der $\cos \varphi$ zu 0,5 bis 0,6 ergibt. Es liegt nun nahe, die als Induktivität wirkende Gasentladung mit einem Kondensator und Widerstand so zu kombinieren, daß resultierend ein Leistungsfaktor von 1 herauskommt.

Außer den genannten einfachen Schaltungen zum Betrieb von Gasentladungsröhren gibt es noch eine sehr große Anzahl anderer Möglichkeiten, von denen hier aber nur noch zwei aufgeführt seien. Zunächst die Verwendung von Streutransformatoren, also Transformatoren mit einem unterbrochenen Eisenkern, die ebenso wirken, wie ein normaler Transformator mit einer Drosselspule. Sie werden besonders dort gebraucht, wo von den normalen Werten der Netzspannung abweichende Bedingungen herrschen, also sehr hohe (etwa 2000 V) oder sehr kleine Zündspannungen. Ferner die Kombination von Drosseln und Kapazitäten, die so abgeglichen sind, daß der Kreis beinahe in Resonanz mit der Netzfrequenz steht (Abb. 23). Auf diese Weise erhält man Überspannungen von beträchtlichen Werten, die zum Betrieb von Röhren mit hohen Zündspannungen, also vor allem Hochdruckröhren, herangezogen werden können.

Nunmehr kehren wir zu unserer Frage zurück, was die neuen Glühelektroden an der Entladung geändert haben.

2. Erhöhung der Leuchtdichte

Vergleicht man die bisher vor allem aus der Reklamebeleuchtung bekannten Hochspannungsröhren mit den entsprechenden neuen Hochleistungsröhren für Netzanschluß, so fällt zunächst der ungeheure Unterschied in der Leuchtdichte auf. Die Steigerung der Leuchtdichte bei den neuen Röhren auf etwa den hundertfachen Wert gegenüber den bisher bekannten Leuchtröhren ist durch die bereits beschriebenen vollkommen geänderten elektrischen Verhältnisse in der Entladungsstrecke begründet, die eine wesentlich höhere Belastung zulassen.

Die Steigerung der Leuchtdichte ist durch die Steigerung der Stromdichte bedingt, die durch Verwendung der beschriebenen neuen Elektroden ermöglicht wurde. Der Fortschritt gegenüber den Hochspannungsröhren zeigt sich am besten durch Vergleich der in der Praxis vorkommenden Belastungen. Während bei den Hochspannungsröhren und Verwendung normaler Elektrodenabmessungen ein Entladungsrohr von etwa 20 mm Durchmesser mit etwa 50 mA belastet wurde, verwendet man bei den Hochleistungsröhren bei gleichem Rohrdurchmesser Belastungen bis zu 5 A. Dieser hundertfachen Steigerung der Stromdichte entspricht eine Erhöhung der Leuchtdichte von einigen zehntel Stilb auf 10 bis 120 Sb.

Eine Erhöhung der Stromdichte und damit auch der Leuchtdichte durch Verkleinerung des Rohrdurchmessers (z. B. Anwendung einer Kapillare) hat man außer für Laboratoriumszwecke bei den Hochspannungsröhren vermieden, weil man in Rücksicht auf den großen Spannungsverlust im Kathodenfall den Spannungsabfall in der positiven Säule naturgemäß möglichst gering halten wollte.

Immerhin ist damit trotz des ungeheueren Fortschrittes gegenüber den alten Röhren erst etwa der zehnte Teil der Leuchtdichte des Wolframdrahtes einer normalen Glühlampe für allgemeine Beleuchtungszwecke erreicht. Wenn nun auch für viele Anwendungsgebiete diese Leuchtdichte völlig ausreicht, zum Teil sogar der geringere Wert gegenüber den Glühlampen in Rücksicht auf die Blendungsgefahr von Vorteil ist, da man diese Röhren ja in den meisten Fällen ohne Streugläser verwendet, so hat man doch versucht, Möglichkeiten zu einer weiteren Erhöhung der Leuchtdichte zu finden, um den Röhren weitere Anwendungsgebiete zu erschließen.

Will man die Leuchtdichte steigern, so kann man dies technisch am bequemsten durch Erhöhung der Querschnittsbelastung erreichen. Dieser Steigerung der Querschnittsbelastung ist aber eine Grenze gesetzt, denn die Wärmeentwicklung an der Glaswand wird durch die immer stärker einsetzende Rekombination von Elektronen und Ionen und vor allem durch die von der Wandung absorbierte Ultraviolettstrahlung so groß, daß das Glasrohr erweicht und schließlich schmilzt. Auch durch Verwendung von Quarzrohr kommt man nicht wesentlich höher als zu den oben genannten Werten. Man hat daher versucht, das Glasrohr von der eigentlichen Entladung völlig abzuschirmen, indem man in das Rohr einen weitmaschigen Metallschlauch oder einen Metallzylinder, der einen seitlichen Schlitz trägt, einbaute. Durch derartige Kunstgriffe gelingt es, die Entladung außerordentlich stark zusammenzuznüren und so bei diesen Schlauch- oder Schlitzlampen (Abb. 25) Stromdichten zu erzielen, die etwa das 2500fache der bisherigen Leuchtöhre erreichen. Bei 400 bis 500 A/cm² kommt

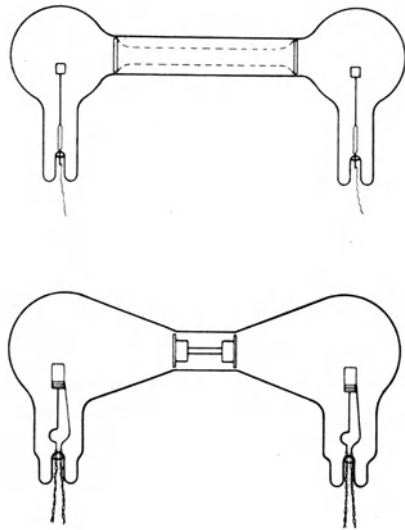


Abb. 25. Ausführungsformen von Schlauch- und Schlitzlampen

man auf diese Weise bis zu Leuchtdichten von 300 bis 600 Sb¹⁾. Damit ist aber die gleiche Leuchtdichte erreicht, wie sie die heutigen gasgefüllten Glühlampen für Allgemeinbeleuchtung besitzen. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Daten der alten und neuen Röhren im Vergleich zu den Glühlampen.

Eine besondere Ausführung dieser Hochleistungsröhren gesteigerter Leuchtdichte sei hier noch erwähnt, da sie bereits eine

¹⁾ Ähnlich hohe Werte der Querschnittsbelastung und damit der Leuchtdichte lassen sich mit eingeschnürten Metaldampfentladungen erzielen (s. S. 44).

Tabelle IV
Leuchtdichte von Glühlampen und Gasentladungslampen

Lichtquelle	Röhren-	Strom-	Leucht-
	durchmesser	dichte	dichte
	cm	A/cm ² etwa	Sb etwa
Kohlenfadenlampe etwa 3,5 W/HK _h . . .	—	3 800	70
Wolframdrahtlampe, luftleer, etwa 25 Watt	—	29 000	250
Wolframdrahtlampe, gasgefüllt, etwa 100 Watt	—	24 000	800
Wolframdrahtlampe, gasgefüllt, etwa 2000 Watt	—	10 500	1900
Moore-Licht	4,0	0,03	0,2
Hochspannungs-Neon-Röhren	2,0	0,03	0,3
Hochleistungs-Neon-Rohr für Netzanschluß 2 A	2,0	0,6	2
Hochleistungs-Neon-Rohr für Netzanschluß 100 A	6,5	3,0	15
Neonentladung und Wolframrohr durch seitlichen Schlitz betrachtet	1,0	7,1	31
Schlauch aus Wolframnetz, axial	Schlauch- durchmesser 1,1	12	100
Wolframrohr in axialer Richtung betrachtet	Rohr- durchmesser 0,2	630	300

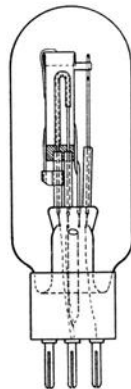
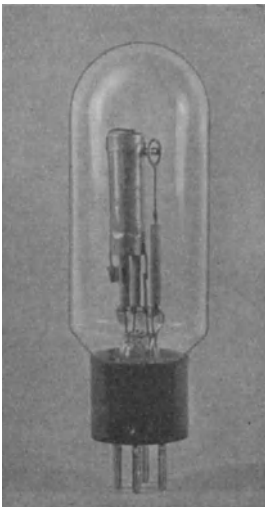


Abb. 26. Lichtspritze

gewisse technische Bedeutung erlangt hat: das ist die sogenannte „Lichtspritze“. Bei dieser ist das gleiche Prinzip wie bei den Schlauch- und Schlitzlampen verfolgt, nur ist der Mantel des Zylinders, der in diesem Falle die Einschnürung der Entladung bewirkt, vollkommen geschlossen; die Anode ist ringförmig ausgebildet und umschließt das eine Ende

des Einschnürungsrohres, so daß man in diesem durch den Anodenring hindurch die positive Säule in der Längsrichtung betrachtet. Auf diese Weise wird eine kleine Fläche gleichmäßig hoher Leuchtdichte erzielt, das Licht „spritzt“ aus dem Einschnürungsrohr heraus (Abb. 26). Mit solchen Lichtspritzen sind die erwähnten Höchstwerte der Leuchtdichte erzielt worden.

Und wie steht es nun mit dem wesentlichen Faktor, der Ökonomie der neuen Röhren ?

3. Die Ökonomie der Lichterzeugung

Die im vorigen Abschnitt geschilderte Möglichkeit der überraschenden Steigerung der Stromdichte und die damit verbundene weitere Erforschung der Vorgänge in einer Entladungsstrecke führten naturgemäß auch gleichzeitig zu Versuchen, die Lichtausbeute dieser Röhren, die kurz als „Hochleistungsleuchtröhren“ bezeichnet werden, zu verbessern.

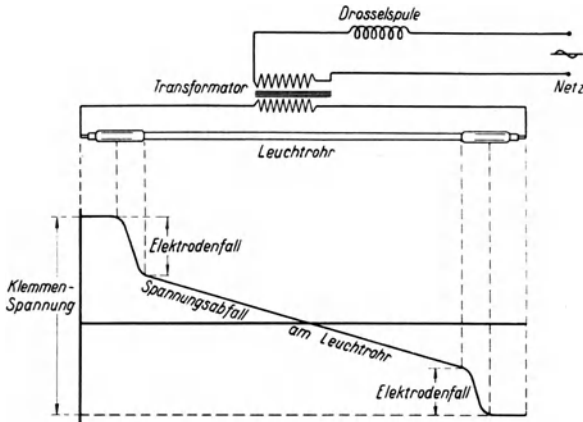


Abb. 27. Spannungsabfall in einer Hochspannungs-Leuchtröhre (Entladung bei kalten Elektroden)

Die alten Neonröhren mit kalten Elektroden für Hochspannung hatten bei kleinen Rohrlängen eine Lichtausbeute von nur etwa 3 bis 5 Lm/W, die allerdings beim Übergang zu großen Längen, Röhren von 5 m Länge und mehr, bis auf 12, im günstigsten Falle sogar bis auf 18 Lm/W gesteigert werden konnte. Dies hat seinen

Grund darin, daß bei großen Rohrlängen die an der Röhre liegende Brennspannung groß gegenüber dem Spannungsverlust im Kathodenfall ist oder umgekehrt, der Kathodenfallverlust im Verhältnis klein gegenüber dem Gesamtspannungsabfall in der Röhre (Abb. 27). Die ersten Röhren der neuen Art mit Glüh Elektroden für Netzanschluß ergaben demgegenüber bereits Lichtausbeuten von 15 . . . 20 Lm/W, und zwar eben durch die Beseitigung des Kathodenfalles unabhängig von der Länge des Rohres. So war es naheliegend, daß die nunmehr gegebene Möglichkeit, die Elektrodenverluste einzuschränken, im Idealfalle sogar zu vermeiden, von neuem zur Untersuchung der Frage anregte, mit welcher Ökonomie man denn überhaupt im günstigsten Falle auf diese Weise Licht erzeugen könnte und ob der alte Traum nicht doch verwirklicht werden würde, elektrische Energie verlustlos in Lichtenergie umzusetzen, d. h. also mit einem Wirkungsgrad von 100 % arbeiten zu können. Besonders anregend für solche Untersuchungen war des weiteren die schon in der Einleitung erwähnte Tatsache, daß bei der geordneten Strahlungsanregung man es ja durch die Wahl des anzuregenden Gases in der Hand hat, verschiedene Gebiete des gesamten Spektrums getrennt anzuregen, unter Umständen also Energie innerhalb des sichtbaren Gebietes zu erzeugen. Es liegt noch nicht lange zurück, daß man im Gegensatz zu diesen Überlegungen geglaubt hatte, theoretische Gründe auch dafür finden zu können, daß eine Steigerung der Ökonomie über eine Grenze von wenigen Prozent nicht möglich sei. Auf Grund der heutigen Erkenntnis wissen wir, um das Ergebnis gleich vorwegzunehmen, daß man Licht tatsächlich mit einem Wirkungsgrad von nahezu 100 % erzeugen kann. Allerdings stellen diese Untersuchungen, wie noch im einzelnen dargelegt werden wird, einen rein wissenschaftlichen Nachweis dar, über dessen technische Folgerungen im Augenblick noch nichts gesagt werden kann.

Um auf diese Untersuchungen näher eingehen zu können, müssen wir zuvor die Energiebilanz einer elektrischen Gasentladung der hier in Frage kommenden Art betrachten, d. h. feststellen, was mit der zugeführten Energie geschieht. Wie früher erwähnt, nutzt die Technik die Lichterzeugung in der sogenannten positiven Säule (s. S. 25) aus, da in dieser die Ökonomie am größten ist. Zu den Energieabgaben gehört nun auch das erzeugte und abgestrahlte Licht,

und unsere Frage lautet, in welchem Verhältnis steht diese abgestrahlte Lichtenergie zu der zugeführten elektrischen Energie¹⁾.

Wir wissen bereits, daß die Vorgänge, die bei der Gasentladung zur Lichterzeugung führen, von der Geschwindigkeit der Elektronen abhängen, und entsprechend den hierbei zu unterscheidenden drei verschiedenen Hauptfällen (s. S. 11ff.) können wir auch die verschiedenen Formen der Energieabgaben betrachten. Bleiben wir in der Reihenfolge der genannten früheren Betrachtung, so haben wir zunächst die „elastische Energieabgabe“: Das Elektron trifft mit verhältnismäßig kleiner Geschwindigkeit auf das Atom und wird von diesem elastisch reflektiert (Fall 1 auf S. 11), es findet dabei ein Austausch kinetischer Energie zwischen Elektron und Atom statt, der sich in Erwärmung des Gases auswirkt.

Die beiden anderen Fälle kann man im Gegensatz zu dieser elastischen Energieabgabe zusammenfassen zu der Gruppe der „unelastischen Energieabgabe“. Hat die Geschwindigkeit des aufprallenden Elektrons einen bestimmten Mindestbetrag (Fall 2 auf S. 11), so tritt Anregung des Atoms ein, es findet, wie man sagt, eine Anregungsenergieabgabe statt. Es ist dies der erste der beiden Fälle der unelastischen Energieabgabe. Die angeregten Atome werden hierbei ihre Energie abstrahlen und je nach dem Spektralgebiet, in dem diese Abstrahlung erfolgt, Ultraviolett-, Licht- und Wärmestrahlung aussenden, wobei allerdings wieder ein größerer oder kleinerer Teil, je nach der Verteilung der frei werdenden Energie auf die verschiedenen Wellenlängen, von der Glaswand des Rohres absorbiert und dort in Wärme umgesetzt wird. Schließlich können die angeregten Atome ihre Energie auch unmittelbar in Wärme umsetzen, und zwar sowohl durch Abgabe an Gasatome (kinetische Energie) als auch beim Stoß gegen die Glaswand des Rohres in thermische Energie der Wandmoleküle. Man bezeichnet die Ursache dieser Art von Auslöschung der Energie als „Auslöschender Stoß zweiter Art“.

Nunmehr bleibt noch der zweite Fall der unelastischen Energieabgabe zu betrachten, nämlich wenn die Geschwindigkeit des auf-

¹⁾ Eine physikalisch exakte Darstellung der Vorgänge wird auf S. 87ff. gegeben.

prallenden Elektrons zu groß ist, daß ein Atomelektron vollkommen aus dem Atomverband herausgerissen, also die Zahl der freien Elektronen vermehrt wird und eine Ionisation des Gases stattfindet (Fall 3 auf S. 12). Man bezeichnet diese Art der Energieabgabe daher als Ionisationsenergieabgabe. Die hierbei gebildeten Ionen können rekombinieren, also mit langsamen Elektronen wieder Atome bilden. Findet diese Rekombination nicht an der Wand statt, so wird die dadurch frei werdende Energie abgestrahlt, oder, was allerdings seltener vorkommen wird, ausgelöscht, also auch wieder in Wärme umgesetzt werden.

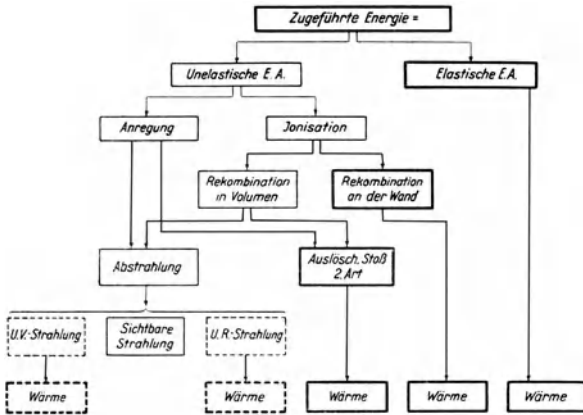


Abb. 28. Schema einer Energiebilanz der positiven Säule

Fassen wir zusammen, so erhält man folgendes Schema der Energiebilanz der positiven Säule (Abb. 28): Die zugeführte Energie wird „elastisch“ und „unelastisch“ abgegeben, wobei die unelastische Energieabgabe zur Anregung und Ionisation der Gasatome verwandt wird; elastische Energieabgabe, also Wärmezeugung, Anregung, also Abstrahlung und Stoßionisation waren aber die drei Fälle, die wir auch im Anfang zur Erklärung der physikalischen Vorgänge in der Gasstrecke (s. S. 10ff.) unterscheiden mußten. In dem Schema sind zur besseren Übersicht die für die Strahlungserzeugung verlustbringenden Prozesse durch dicke Umrandung gekennzeichnet.

Auf Grund der Erkenntnis der Energiebilanz gilt es nun, das Verhältnis der nutzbringenden und verlustbringenden Energieabgaben zueinander durch passende Wahl der Abmessungen des Rohres, der Art des Füllgases und der Entladungsbedingungen so zu gestalten, daß die Ökonomie möglichst groß wird. Wie sich bei der Erklärung der physikalischen Grundlagen jeder Gasentladung und zuletzt auch bei der Erörterung der Energiebilanz der positiven Säule gezeigt hatte, ist die Größe der Geschwindigkeit der Elektronen innerhalb des Entladungsraumes von ausschlaggebender Bedeutung, und sie ist es auch bei der Lösung dieser Aufgabe. Für die Energieübertragung zwischen Elektronen und Atomen ergibt sich nämlich, daß einmal eine kritische Geschwindigkeit vorhanden ist, die sogenannten Anregungs- bzw. Ionisationsspannungen (Abb. 54), unterhalb derer überhaupt keine Energie unelastisch übertragen wird, d. h. also Ausstrahlung stattfinden kann, und daß zum anderen eine optimale Geschwindigkeit besteht, bei der die Ökonomie der Energieübertragung ein mehr oder weniger ausgeprägtes Maximum besitzt, d. h. also bei Ausstrahlung im sichtbaren Gebiet die Lichtausbeute am günstigsten ist.

Wie diese Zahlen zeigen, sind die Anregungs- und Ionisationsspannungen für die Metalldämpfe im allgemeinen erheblich kleiner als für die Edelgase, und weitere Untersuchungen haben gezeigt, daß bei manchen Metalldämpfen auch die Rekombination im Volumen, wodurch also auch Abstrahlung erfolgen kann, erheblich günstiger ist. Man wird daher zwangsläufig dazu geführt, Metalldämpfe zur Lichtausstrahlung anzuregen. Hierbei geht man so vor, daß man zur Einleitung der Entladung Edelgase als sogenannte Grundfüllung benutzt und das Metall als Bodenkörper in fester oder flüssiger Form in das Rohr einbringt. Nach erfolgter Zündung wird dann das Metall mit zunehmender Erwärmung des Rohres allmählich verdampfen und so der Dampfdruck im Rohr wachsen. Je höher aber der Druck wird, um so mehr werden die Elektronen durch Anregung und Ionisation des Metalldampfes gebremst und die Emission des Grundgases geht gegenüber der des Metalldampfes immer mehr zurück, bis schließlich das Grundgas praktisch überhaupt nicht mehr angeregt wird und nur noch der Metalldampf allein Strahlung aussendet; das Grundgas hat dann nur noch die Aufgabe, mit an der

Reflexion der Elektronen zu wirken und durch eine Erhöhung des Weges, den dadurch die Elektronen zurückzulegen gezwungen werden, für eine Vergrößerung der Stoßzahl zu sorgen.

Bei all diesen Betrachtungen über die Ökonomie der Lichterzeugung muß stets beachtet werden, daß die wirtschaftlich günstigen Betriebsbedingungen je nach der Art der erzeugten Strahlung unter Umständen ganz verschieden sein können. Generell muß man zwei Fälle unterscheiden: die Erzeugung tageslichtähnlichen Lichtes und die Erzeugung von einfarbigem Licht.

Die Spektrallinien, die für die Erzeugung monochromatischen Lichtes in Frage kommen, sind „Resonanzlinien“, d. h. sie gehen von dem Grundniveau des Atoms aus. In diesem Fall hat man alle in ihrer Häufigkeit mit der Dampf- und Stromdichte stark anwachsenden Prozesse, wie stufenweise Anregung und Ionisation¹⁾, zu vermeiden, also möglichst kleine Dampfdichte und kleine Stromdichte zu wählen.

Man kann nun allerdings die Dampfdichte nicht beliebig klein werden lassen, da bei Metaldampf-Edelgasröhren dann die Reinheit des Spektrums leidet, das Grundgas „stark durchkommt“ und bei Edelgasröhren sich bei zu kleiner Dichte die für eine ökonomische Lichtanregung wichtige Diffusion der Elektronen (s. S. 82) nicht genügend ausbilden kann.

Liegen hingegen die gewünschten Linien im Termschema²⁾ so, daß sie nur durch stufenweise Anregung auftreten, so sind im Gegensatz zu dem eben Gesagten hohe Stromdichte und hoher Dampfdruck anzuwenden. Hierbei tritt unter Umständen noch eine Verbesserung der Ökonomie durch Kontraktion der Säule hinzu.

Die für einfarbige Lichtquellen erzielbaren Ökonomien sind sehr hoch, z. B. bei Natriumdampf (Dampfdichte etwa 10^{-2} mm Hg, Stromdichte etwa 50 mA/cm^2) etwa 70 %, bei Quecksilberdampf (Dampfdichte 760 mm, Stromdichte 10 bis 20 A/cm^2) etwa 30 %, also ganz beträchtlich höher als bei Glühlampen. Man unterscheidet gelegentlich zwischen Niederdruck- und Hochdruckröhren, ohne das bisher eine scharfe Abgrenzung zwischen beiden Arten besteht. Die genannte Natriumdampflampe wäre eine typische Niederdrucklampe, während die genannte Quecksilberdampfröhre als Hochdrucklampe zu bezeichnen wäre. Vielleicht sollte man beide Entladungstypen dadurch abgrenzen, daß man von Hochdruckröhren nur in solchen Fällen spricht, in denen eine merkliche Zusammenziehung (Kon-

¹⁾ Siehe S. 75.

²⁾ Siehe S. 70.

traktion) der Lichtsäule stattfindet (s. S. 17), wobei allerdings die Schlauchentladung auszuschließen ist.

Zur Erzeugung tageslichtähnlichen Lichtes kommen, abgesehen von Molekülspektren, wie beim Kohlendioxyd und ähnlichen, die an und für sich unökonomisch in der Anregung sind, hauptsächlich die Alkalien- und Erdalkalienmetalle in Frage, und zwar besonders die Rekombinationserscheinungen an den Alkalien und in Thallium. In diesen Fällen handelt es sich um Wirkungen, die mit einer hohen Potenz der Stromdichte sowie proportional dem Gasdruck wachsen; man hat also hohe Strom- und Dampflichte zu wählen. Nach diesem Gesichtspunkt konstruierte Tageslichtlampen sind zwar technisch noch nicht durchgebildet, liegen aber durchaus im Bereich des Möglichen.

Will man nun auf diese Weise möglichst große Lichtausbeute erzielen, so muß man einen Metaldampf wählen, der nur im sichtbaren

<u>Lichtquelle</u>	<u>Art der Strahlung</u>	<u>Visueller Nutzeffekt der Gesamtstrahlung in %</u>	<u>Aufzuwendende Leisti. zur Erzeugung der Lichtstromeinheit W/Lm</u>	<u>Lichtausbeute Lm/W</u>
<i>Theoretische Werte</i>				
Monochromatischer Strahler	Idealfall (Strahlung auf $\lambda = 555 m\mu$) (gelb-grün) im Maximum der Augenempfindlichkeit	100	0,00145 definiert als mech. Lichtäquivalent	$\frac{1}{0,00145} = 689,6$
	Strahlung auf $\lambda = 589 m\mu$ (D-Linie des Natriums)	77	$0,00145 \cdot \frac{100}{77} = 0,0019$	$689,6 \cdot \frac{77}{100} = 531,0$
<i>Praktische Werte</i>				
Natriumdampf= Lampe	Strahlung auf $\lambda = 589 m\mu$ sowie auf 3 Wellenlängen im Ultraroten	70	bei Fremdgeheizung $0,0019 \cdot \frac{100}{70} = 0,0027$	$531 \cdot \frac{70}{100} = 371,7$
		9,5	unter Berücksichtigung aller Wärmeverluste $0,0019 \cdot \frac{100}{9,5} = 0,0200$	$531 \cdot \frac{9,5}{100} = 50,0$

Abb. 29. Theoretisch mögliche und praktisch erreichbare Werte der Lichtausbeute für Natriumdampf

Gebiet strahlt, und zwar möglichst nur allein im Gelbgrünen. Gelingt dies, so könnte man bei verlustloser Energieumsetzung auf eine Ökonomie von 689,6 Lm/W kommen (s. S. 9 und Abb. 29). Einem solchen bisher nicht herstellbaren Gelbgrünstrahler kommt das Natrium, dessen Spektrum im sichtbaren Gebiet ja lediglich die beiden D-Linien von 689 m μ aufweist, am nächsten. Da für diese Wellenlänge die relative Augenempfindlichkeit 77 % der maximalen Empfindlichkeit für die Wellenlänge von 555 m μ beträgt, könnte man im Maximum $589,6 \cdot 0,77$, also 531 Lm/W, erreichen. Nun strahlt das Natrium aber auch noch im Ultrarot, so daß dieser

Verlust zu den aus der Energiebilanz folgenden Wärmeverlusten noch hinzukommt. Führt man aber einen derartigen Versuch so durch, daß man alle diese Verlustquellen ausschaltet und rechnet man auch die Energie, die notwendig ist, um das Natrium zu verdampfen und den nötigen Natriumdampfdruck zu halten, nicht mit, heizt also ein solches Rohr von außen, so erhält man für die D -Linien bei Argonfüllung als Grundgas und einer Belastung von $0,1 \text{ A/cm}^2$ etwa 370 Lm/W , d. h. also 70% des theoretisch Möglichen. Mit diesem Versuch, der in der Studiengesellschaft für elektrische Beleuchtung (Osramkonzern) durchgeführt wurde, ist der Nachweis erbracht, daß eine nahezu verlustlose Umsetzung elektrischer Energie in Lichtenergie zum mindesten denkbar ist (Abb. 30).

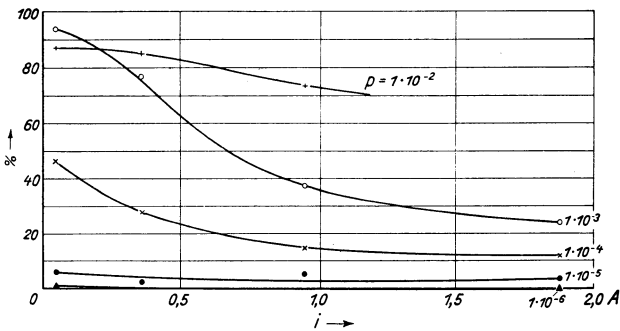


Abb. 30. Ökonomie der positiven Säule einer Gasentladung zur Erzeugung monochromatischen Lichtes (Natrium- D -Linien) in Abhängigkeit von Stromstärke und Druck

Hierbei hat man sich vor Augen zu halten, daß ein großer Teil der sogenannten Verlustenergie unbedingt erforderlich ist, um z. B. bei Metallampflampen zunächst den Dampf zu erzeugen und dann den nötigen optimalen Dampfdruck aufrechtzuerhalten, so daß also die hierzu benötigte Energie mit der eigentlichen Ökonomie der Lichterzeugung in der positiven Säule unmittelbar nichts zu tun hat. Trotzdem ist es naturgemäß die wichtigste Aufgabe der Technik der Gasentladungsröhren, diese sozusagen lebenswichtige Verlustleistung einzuschränken. Bisher hat man unter Berücksichtigung dieser „Verluste“ bei der genannten Natriumampflampe bei einer Stromdichte von 1 bis 2 A/cm^2 eine Ökonomie für die D -Linien von 9% , also eine Lichtausbeute von etwa 50 Lm je Watt , erreicht, und es liegen bereits weitere umfangreiche Versuche, in dieser Richtung weiterzukommen, vor. So kann man z. B. durch Einführung von Elektroden, die bereits bei kleineren Temperaturen Elektronen emittieren, vor allem aber durch Verringerung

der Wärmeverluste der Entladungsröhre¹⁾, also Verminderung der zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur erforderlichen Energie- menge, erhebliche Fortschritte erwarten.

Bei der technischen Auswertung dieser Versuche ist zu berücksichtigen, daß ein gelbgrüner Strahler, der theoretisch die günstigsten Werte liefert, für allgemeine Beleuchtungszwecke wegen seiner Farbe nicht in Frage kommt. Denn man kann hier nicht allein die Ökonomie in den Vordergrund stellen, sondern muß auch die physiologischen Anforderungen, die an den Strahler zu stellen sind, berücksichtigen. Aber auch in dieser Hinsicht bieten die Hochleistungs- röhren für Netzanschluß Möglichkeiten, die ganz neue Wege weisen, und damit kommen wir zu der letzten Anforderung, die an die neuen Hochleistungs- röhren zu stellen ist: wie kann die Lichtfarbe dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt werden?

4. Anpassung der Lichtfarbe an den Verwendungszweck

Die lichtwirtschaftlichen Untersuchungen der letzten Jahre, insonderheit die Arbeiten über den Einfluß der Beleuchtung auf die Leistungsfähigkeit des Menschen, haben die Bedeutung des künstlichen Lichtes für die menschliche Arbeit und damit die wirtschaftliche Bedeutung zweckmäßiger Beleuchtung immer mehr erkennen lassen. Beim Sehvorgang spielen aber, da ja das Auge der Empfänger ist, der uns durch die Beleuchtung als Mittler der optischen Erscheinungen Kenntnis von der Umwelt gibt, physiologische und psychologische Vorgänge eine bedeutsame Rolle und so ist auch die Farbe des Lichtes ein Faktor, der bei jeder künstlichen Beleuchtung berücksichtigt werden muß. Die Farbe des Lichtes ist ein Mittel, einem Raum eine gewisse Stimmung zu verleihen. Feine Haarrisse in Werkstoffen lassen sich bei einfarbigem (monochromatischen) Licht leichter und besser erkennen als bei weißer oder sonstiger mehrfarbiger Beleuchtung, und ebenso liegt es bei dem Erkennen von Gegenständen auf größerer Entfernung im Nebel. So ist es bei jeder Beleuchtungsaufgabe immer wieder die Farbe des Lichtes, die besondere Beachtung erfordert.

Die Gasentladungslampen sind in bezug auf die Farbe des erzeugten Lichtes, wie schon erwähnt, von den übrigen Lichtquellen

¹⁾ Technisch geschieht dies dadurch, daß man das Entladungsrohr in bekannter Weise mit einem Mantelrohr umgibt und den Zwischenraum evakuiert (s. S. 89).

insofern unterschieden, als man bei ihnen es durch Wahl des Füllgases prinzipiell in der Hand hat, denjenigen Teil des Spektrums anzuregen, der für den geforderten Verwendungszweck geeignet ist. Bei den meisten Gasentladungslampen haben wir es demzufolge mit einer ausgesprochenen Farbigkeit des Lichtes zu tun, die für die Verwendung der Lampen von grundlegender Bedeutung ist.

Sehr oft ist diese ausgesprochene Farbigkeit des Lichtes der Gasentladungsröhren von großem Vorteil, nämlich in allen den Fällen, in denen man bisher bei Verwendung von Glühlampen mit Farbfiltren arbeitet, sei es, daß man diese vor die Lampe setzt oder in Form von gefärbtem Glühlampenkolben benutzt. Als Beispiel sei das Gebiet der Phototechnik genannt, dann aber auch die verschiedensten Anwendungen des Lichtes in der Verkehrs- und Signalbeleuchtung, in der Lichtreklame und schließlich die Lichtquellen für wissenschaftliche, insonderheit optische Untersuchungen und technische Prüfungen. Für all diese mannigfachen Verwendungszwecke bieten die Gasentladungslampen unter Umständen besondere Vorteile und eröffnen zum Teil ganz neue Wege (s. Kap. V).

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse, wenn es sich um Schaffung von Lichtquellen für allgemeine Beleuchtungszwecke handelt. In diesem Falle ist die Farbigkeit des Lichtes der Gasentladungslampen zunächst ein ausgesprochener Nachteil. Ein Raum, der tagsüber mit natürlichem Licht versorgt wird und für dessen Beleuchtung die „Farbe“ des Sonnenlichtes zweckentsprechend ist, wird natürlich auch in den Dunkelstunden am besten mit weißem, also tageslichtähnlichem Licht beleuchtet werden. Dies gilt besonders auch für diejenigen Fälle, in denen der Raum bereits tagsüber nur spärlich mit natürlichem Tageslicht versorgt ist und infolgedessen eine künstliche Zusatzbeleuchtung erhalten muß. In solchen Fällen hat man sich bisher mit Tageslichtlampen oder gewöhnlichen Glühlampen in Tageslichtleuchten geholfen. Wenn man im übrigen aber bei künstlicher Beleuchtung gewöhnliche Glühlampen anwendet, also eine Lichtfarbe, in der die Intensität des roten und gelben Teiles des Spektrums relativ größer ist als im Tageslichtspektrum, so hat das rein psychologische Gründe. Am Tage sind wir Beleuchtungsstärken von einigen 10000 Lx gewöhnt (Abb. 31). Beleuchtet man nun einen Raum mit weißem Licht, wendet aber nur

Energien auf, die eine Beleuchtungsstärke in der Größenordnung von 100 Lx ergeben, so wirkt dieser Raum fahl und kalt, so etwa wie das Tageslicht bei einer partiellen Sonnenfinsternis auf uns wirkt. Allein aus diesem Grunde verwendet man heute eine „wärmere“, also mehr rotes und gelbes Licht enthaltene künstliche Beleuchtung. Will man nun mit Gasentladungslampen die Aufgabe der Allgemeinbeleuchtung lösen, so ist, wie schon gesagt, die ausgesprochene Farbigkeit des Lichtes zunächst vom Nachteil. Verwendet man Neon als Grundgas, so hat man ein ausgesprochen rotes Licht, setzt man Quecksilber hinzu, so erhält man ein bläuliches Licht, verwendet

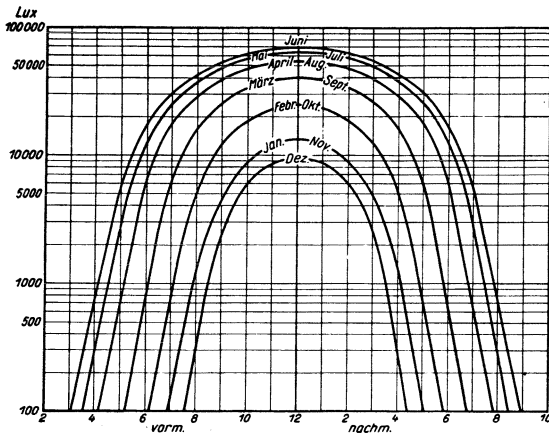


Abb. 31. Täglicher Gang der Beleuchtungsstärke
(Horizontalbeleuchtung) im Freien (Monatsmittel)

man Metalldämpfe, z. B. Natriumröhren, so bekommt man ein intensives gelbes Licht, alles Farben, die aus psychologischen Gründen für eine allgemeine Beleuchtung nicht geeignet sind, ganz abgesehen davon, daß bei dieser künstlichen Beleuchtung die Farben der Umwelt unserem Auge ganz anders erscheinen würden als am Tage; bei vollkommen einfarbiger Beleuchtung hätte man ja nur helle und dunkle Töne dieser Farbe.

Die Gasentladungslampen bieten nun aber die Möglichkeit einer einfachen Lösung auch solcher Aufgaben, bei denen künstliches Tageslicht oder überhaupt Licht bestimmter Farbzusammensetzung gefordert wird. Diese einfache Möglichkeit besteht in der Farbmischung durch Anwendung mehrerer verschieden farbiger Leucht-

röhren oder in der Kombination von Leuchtröhren und Glühlampen, wie sie unter dem Namen „Verbundstrahler“ ausgebildet worden sind. Betrachten wir zunächst die Farbmischung durch Anwendung mehrerer Leuchtröhren, wobei es lediglich eine Frage der Wirtschaftlichkeit ist, ob man die genannte Mischung in ein und demselben Rohr oder aber durch Verwendung mehrerer Röhren vornimmt. Es ist ohne weiteres verständlich, daß man theoretisch auf diese Weise jede gewünschte Farbwirkung erzielen kann. Man ordnet die verschieden farbigen Licht aussendenden Röhren nebeneinander an und läßt das Licht durch geeignete Streugläser, die man vor die Röhren schaltet, austreten; man erhält auf diese Weise einen Strahler der gewünschten Lichtfarbe. Bei Kombination der Röhren mit Glühlampen geht man in der gleichen Weise vor, kann aber hierbei unter Umständen die Glühlampen gleichzeitig als Vorschaltwiderstand, den ja alle Röhren haben müssen (s. S. 32), benutzen. Eine solche oder ähnliche Kombination, für die also, wie schon erwähnt, der Name Verbundstrahler eingeführt ist, wird wahrscheinlich in der Zukunft noch weitgehende Anwendung finden. Als ein besonders interessantes und wahrscheinlich auch bedeutungsvolles Anwendungsbeispiel sei hier nur auf folgende Möglichkeit hingewiesen: man benutzt eine Hochleistungsröhre mit Quecksilberdampfzuführung, und zwar unter Anwendung ultraviolett durchlässigen Glases. Verwendet man dieses Rohr nun mit Glühlampen, die gleichzeitig als Widerstand brennen, so erhält man bei geeigneter Kombination einen Verbundstrahler, der durch seine Leuchtröhre starke Ultraviolettintensität aussendet und durch die Glühlampen Licht und Wärme, der also eine der Hochgebirgssonne entsprechende Strahlung besitzt.

Neben dem genannten Verfahren der Lichtmischung sind noch zwei weitere Wege zur Herstellung tageslichtähnlicher Beleuchtung bekannt, zunächst die Anwendung von Molekülgasen. Verwendet man, um das Tageslichtspektrum möglichst genau zu erzielen, Kohlendioxyd, so erhält man eine in seiner Farbzusammensetzung praktisch dem Tageslicht vollkommene gleiche Lichtstrahlung, muß aber dafür den Nachteil einer schlechten Ökonomie mit in Kauf nehmen und ebenso einige technische Schwächen, wie z. B. die Notwendigkeit, dem Rohr ständig Füllgas nachliefern zu müssen, also ein Atemventil anzuwenden, da die Röhren sonst, wie schon im Kap. III ausgeführt,

hart werden. Wesentlich eleganter ist die zweite Lösung des Problems, auf die man in allerjüngster Zeit gekommen ist. Wie bereits oben erwähnt, kann man durch starke Anregung eines Atoms das ausgesandte Spektrum weitgehend „auffüllen“, so daß mit wachsender Anregungsstärke das Spektrum einen immer mehr kontinuierlichen Charakter annimmt, die einzelnen Farben mehr und mehr fortlaufend ineinander übergehen. Auf diese Weise kann es gelingen, Tageslichtröhren mit einer Ökonomie herzustellen, die der großer gasgefüllter Glühlampen entspricht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die neuen Hochleistungsröhren, die wie in den früheren Abschnitten ausgeführt, direkt an die bestehenden Lichtnetze angeschlossen werden können, die eine hohe Leuchtdichte besitzen und die in ihrer Ökonomie die höchsten Werte der Lichtausbeute der bisher vorhandenen Lichtquellen erreichen und zum Teil sogar erheblich übertreffen, auch bezüglich der Lichtfarbe die theoretische Möglichkeit bieten, alle gestellten Anforderungen für die verschiedensten Anwendungsgebiete zu erfüllen. Inwieweit schon heute für die Praxis solche Strahler ausgebildet worden sind und welche Hoffnungen in der allernächsten Zukunft erfüllt werden können, soll im nächsten Kapitel geschildert werden.

Fünftes Kapitel

Verwendungsmöglichkeit der Hochleistungsleuchtröhren für Netzanschluß

Über die Verwendung der neuen Leuchtröhren für Netzanschluß kann im gegenwärtigen Entwicklungsabschnitt noch nichts Endgültiges gesagt werden. Die Möglichkeiten aber, die schon jetzt erkennbar sind, und die sich zum Teil auf ganz neuen Wegen bieten, sind derartig vielgestaltet und erscheinen so aussichtsreich, daß man wohl mit Recht auf ganz neuartige Erfolge hoffen darf.

Die bisher auf dem Markt befindlichen Hochspannungsrohren haben sich in größerem Maße nur in der Reklamebeleuchtung einführen können. Es sind dies die bekannten Neonröhren rötlicher Lichtfarbe, die mit Quecksilberzusatz blaues und in gelbem Rohr

grünes Licht liefern. Die Notwendigkeit der Hochspannung für die Installation und die meist auch wenig befriedigende Wirtschaftlichkeit haben eine größere Verbreitung und eine allgemeine Anwendung der Röhren verhindert. In der Reklamebeleuchtung werden sie aber in den drei genannten Ausführungsformen auch fernerhin sich sicherlich behaupten, da sie, besonders als Konturenbeleuchtung verwendet, meist eine ausgezeichnete Wirkung haben.

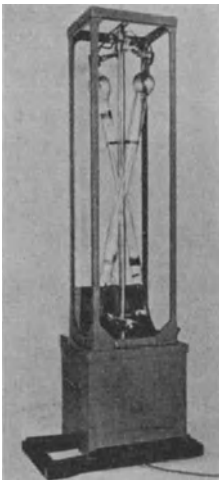


Abb. 32. Neon-Hochleistungsröhre als Flughafen-Ansteuerungsfeuer

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei den Hochleistungsröhren. Die Möglichkeit, diese Röhren ohne weiteres an die Netzspannung anzuschließen, eröffnet ihnen zunächst breiteste Verwendung. In der Reklamebeleuchtung werden sie, da je nach Art der Gasfüllung die verschiedensten Farbwirkungen erzielt werden können, dank ihrer hohen Leuchtdichte besonders da Anwendung finden, wo die alten Hochspannungsleuchtröhren aus diesem Grunde nicht befriedigten. Zudem eröffnen sie dem Architekten eine Fülle von Möglichkeiten neuartiger Formgebung. Die verschiedenen Farbeffekte sind hierbei von besonderem Vorteil, und schließlich wird man auch zur Farbmischung durch Anwendung verschiedener Röhren kommen, um auf diese Weise Transparente zu durchleuchten und Flächen anzuleuchten. Es ist ohne weiteres

denkbar, daß auch die Kombination der alten Hochspannungsleuchtröhren mit den neuen Röhren für Netzanschluß insofern eine Bedeutung erlangt, als man die Hochspannungsröhren als Umrahmungen verwendet, wobei sie wegen ihrer geringeren Leuchtdichte zurücktreten gegen die Hochleistungsröhren, die dann sozusagen den Bildinhalt irgendeiner Lichtreklame darstellen.

Aufs engste mit diesen Anwendungen verknüpft ist die Benutzung der neuen Röhren im Signalwesen. Hier ist es ein besonderer Vorteil, daß man Leuchtröhrensignale schaffen konnte, bei denen auch auf weite Entfernungen hin die Farbe unabhängig von der Absorption durch die Atmosphäre ist, sich also auch bei stark

dunstigem Wetter nicht ändert (Abb. 32). Denn ein Spektrum, das nur aus einer einzigen oder, wie z. B. bei der Natrium- und Neonlampe aus mehreren, aber dicht beieinander liegenden Linien besteht, kann zwar durch die Atmosphäre in seiner Intensität unter Umständen stark geschwächt, niemals aber verfärbt werden. Hinzu kommt, daß man mit den Röhren sehr stark gesättigte Farben erhält und selbst, wenn man zur Erzielung bestimmter Farben Filter verwenden muß, die Lichtausbeute viel höher ist als bei der Verwendung von den bisher üblichen Glühlampen mit Farbfiltern. Welche Werte man der Größenordnung nach wahrscheinlich bei solchen Anlagen für die hauptsächlich in Frage kommenden Farben Rot, Gelb, Grün und Blau im Gegensatz zu den Glühlampensignalen wird erreichen können, zeigt Tabelle V.

Tabelle V

Glühlampe mit Farbglas	Lichtausbeute Lm/W etwa	Lichtdurchlässigkeit des Glases %	Hochleistungsleuchtröhre	Lichtausbeute Lm/W etwa	Lichtdurchlässigkeit des Glases %
rot	2,5	20	Neon (rot)	15	—
gelb	3,8	30	Natrium (gelb)	40	—
grün	2,5	20	Quecksilber mit Farbglas (grün)	14	70
blau	0,3	2	Quecksilber mit Farbglas (blau)	5	25

Aber wie schon angedeutet, bieten die neuen Röhren nicht nur die Möglichkeit, in dem bisher für Röhrenbeleuchtung erschlossenen Gebiete der Reklame- und Signalbeleuchtung Anwendung zu finden, sondern auch für fast alle Gebiete der Allgemeinbeleuchtung. Es ist nicht zu erwarten, daß die Glühlampe hier in absehbarer Zeit durch die neuen Röhren ersetzt wird, jedoch werden diese Röhren wohl sicherlich über kurz oder lang als Ergänzung hinzutreten. Die ausgesprochene Farbigekeit des Lichtes der Leuchtröhren, die sie für die Reklame- und Signalbeleuchtung so vorteilhaft macht, ist für allgemeine Beleuchtungszwecke allerdings zunächst nachteilig, man kann aber bei Verwendung mehrerer Röhren durch Farbmischung fast jeden gewünschten Farbton erzielen. Welche Möglichkeiten sich außer dieser Mischungsmethode bieten, ist bereits an früherer Stelle ausführlich behandelt. Eine besondere Ausführungsform stellen die bis zu einem gewissen Grade bereits ausgebildeten

„Verbundstrahler“ dar. Diese beruhen, wie schon an anderen Stellen erwähnt, auf einer Vereinigung von Röhren und Glühlampen. Eine Verbindung zwischen je einer Cadmium- und Quecksilberröhre mit einer entsprechenden Anzahl Glühlampen gibt z. B. ein Licht, das in seiner spektralen Zusammensetzung dem Tageslicht bei bedecktem Himmel nahekommt. Derartige Strahler sind von besonderer Be-

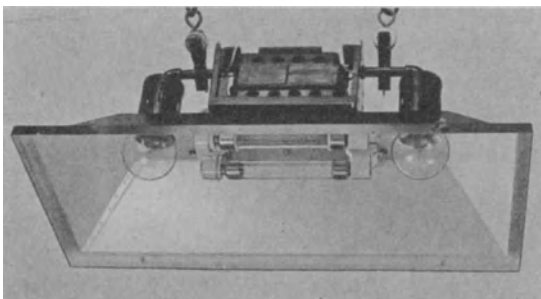


Abb. 33. Verbundstrahler für Arbeitsplatzbeleuchtung

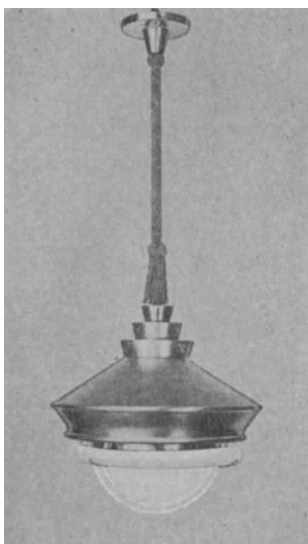


Abb. 34. Verbundstrahler als Pendelleuchte (Glühlampe und Quecksilberröhre)

deutung bei Beleuchtung sehr tiefer Arbeitsräume am Tage, bei denen die Aufgabe gestellt ist, durch ständige Zusatzbeleuchtung ausreichende Arbeitsbedingungen zu schaffen und dabei störendes Zwielicht zu vermeiden (Abb. 33). Die Tageslichtähnlichkeit der Lichtfarbe und die gute Wirtschaftlichkeit erhöhen den Wert dieser Verbundstrahler. Verwendet man Neonröhren in Verbindung mit Glühlampen, so erhält man ein ausgesprochen warmes Licht, ähnlich dem der Kerzenbeleuchtung. Bei der Ausbildung von Leuchtkörpern dieser Art kommt hinzu, daß die Röhren auch hier gleichzeitig als Bauelement des Leuchtkörpers mit-

verwendet werden können und dabei weitestgehende Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Formgebung bieten. Die Verbundstrahler in Abb. 34 und 35 sind erste Anfänge der Anwendung solcher neuartiger Lichtquellen zum Bau von Beleuchtungskörpern. Darüber hinaus werden sich wahrscheinlich Wege eröffnen, die über die heute im allgemeinen übliche Anordnung der Beleuchtungskörper im Raum hinausführen (Abb. 36 und 37).

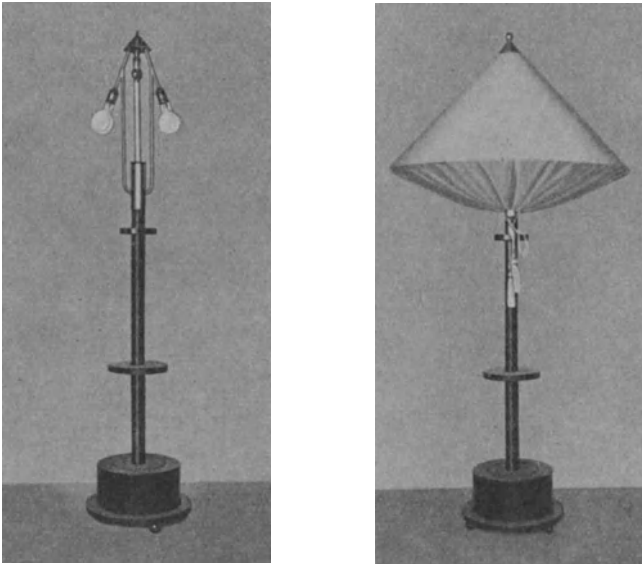


Abb. 35. Verbundstrahler als Stehleuchte (Glühlampe und Quecksilberröhre)

In diesem Zusammenhang interessieren besonders Versuche, das mehr oder weniger monochromatische Spektrum der Gasentladungslampen unter Ausnutzung der Fluoreszenzeigenschaften gewisser geeigneter Substanzen aufzufüllen. Unter Fluoreszenz eines Stoffes versteht man die Eigenschaft, bei Bestrahlung selbstleuchtend zu werden, und zwar verläuft diese Erscheinung stets so, daß das auffallende Licht zum Teil reflektiert, zum Teil aber absorbiert und die absorbierte Energie wieder abgestrahlt wird. Hierbei ist im allgemeinen das ausgesandte Licht langwelliger als das absorbierte. Wenn also z. B. blaues Licht auffällt und absorbiert wird, so kann

der Körper in blauem oder aber auch in grünem oder rotem Licht fluoreszieren. Lichttechnisch wäre der Fall von besonderer Bedeutung, daß ein Körper unsichtbare Strahlung empfängt und absorbiert und im sichtbaren Gebiet leuchtet. Hierbei geht man so vor: eine Quecksilberdampf-lampe strahlt auf einen Fluoreszenzschirm (der z. B. mit Fluorescin präpariert ist), man erhält dann außer der Strahlung der Quecksilberdampf-lampe zusätzlich ein grünes Fluoreszenzlicht.

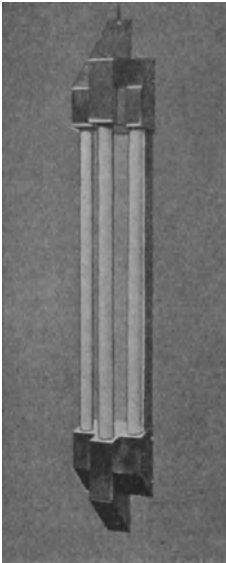


Abb. 36. Verbundstrahler als Wandleuchten
(Quecksilber- oder Neonröhre mit
Osram-Linestra-Lampen)

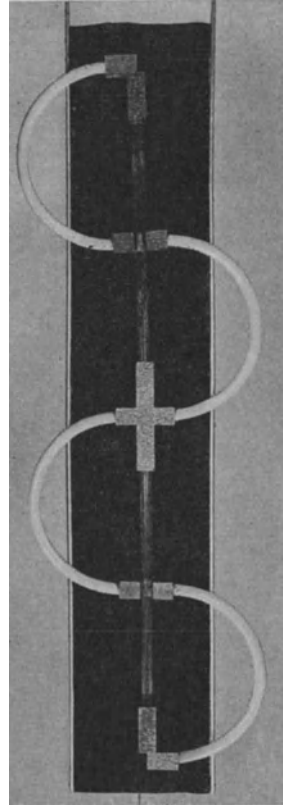


Abb. 37. Verbundstrahler (Neon-
oder Quecksilberröhre mit Osram-
Linestra-Lampen)

Auf diese Weise kann man auch z. B. bei der Quecksilberdampf-lampe die fehlende Rotstrahlung erzeugen, und zwar durch Verwendung eines Fluoreszenzschirmes aus Rhodamin. Die Anregung erfolgt hierbei allerdings in der Hauptsache durch sichtbare und nur zum geringen Teil durch ultraviolette Strahlung. Das Wesentliche an diesen Versuchen ist, daß durch sie der Nachweis gelang, durch Verbindung

einer Quecksilberdampfampe mit geeigneten fluoreszierenden Körpern praktisch alle Farbwirkungen erzielen zu können.

Auf die Verwendung der Verbundstrahler für hygienische Zwecke war bereits hingewiesen. Hierbei kommt es wohlgemerkt nicht in jedem Falle darauf an, daß die Ultraviolettstrahlung zur Erzeugung einer Hautrötung (Erythem) ausreichend ist, da schon eine bedeutend geringere UV-Intensität genügt, um die allgemeinen biologischen Kräfte des Körpers anzuregen und seine normalen Nutzfunktionen gegenüber gewissen Krankheiten zu steigern. Eine

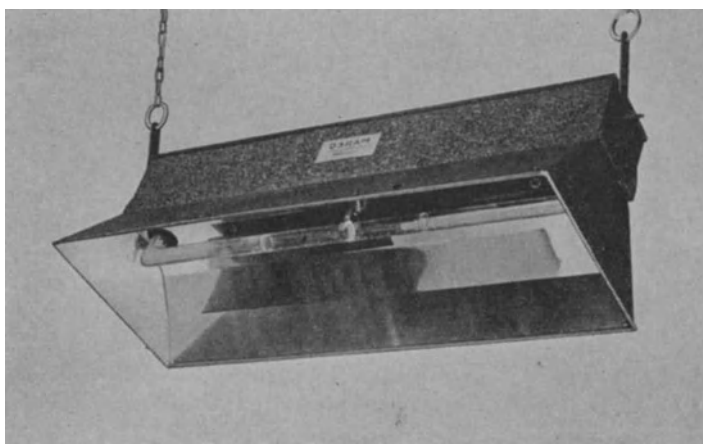


Abb. 38. Osram-Ultraröhre (Quecksilberdampfampe in ultraviolett-durchlässigem Glase)

derartige „hygienische Beleuchtung“ könnte die normale Zimmerbeleuchtung in biologischer Hinsicht ergänzen. Hier sei aber noch auf die Einrichtung von Räumen künstlichen Sonnenscheins (Turnsäle, Liegeveranden, Schwimmbäder u. dgl.) mit Hilfe solcher Strahler kurz eingegangen. An die Lichtquellen für diese Räume muß die Forderung gestellt werden, daß sie sowohl Licht- als auch Wärme- und Ultraviolettstrahlung aussenden, und zwar in einer solchen relativen Intensitätsverteilung, wie sie der Sonnenstrahlung entspricht. Die bisherigen bekannten Therapiebestrahlungsquellen erfüllen diese Anforderungen nicht. So liegt das Hauptgewicht der Strahlung der Quarzquecksilberlampe im Ultraviolett, und die Glühlampen sind reine Licht- und Wärmestrahler. Um diesem Mangel

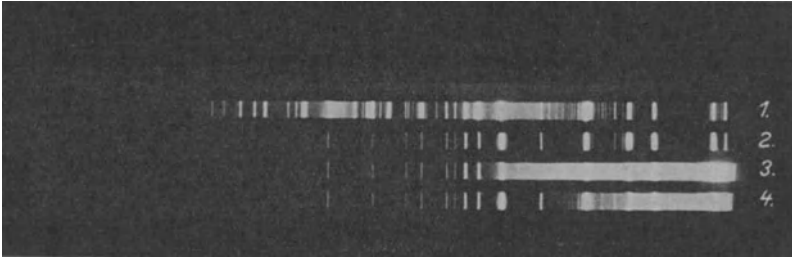


Abb. 39. Die Spektren einiger UV-Strahler

1. Quarz-Hg-Lampe, 2. Ultra-Leuchtröhre, 3. Kombination: Ultra-Leuchtröhre mit Vitalux-Lampe, 4. Kombination: Ultra-Leuchtröhre mit Nitra-Lampe

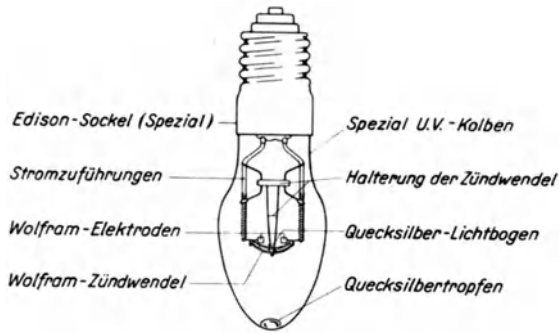


Abb. 40. Innenaufbau der Osram-Solarca-Lampe

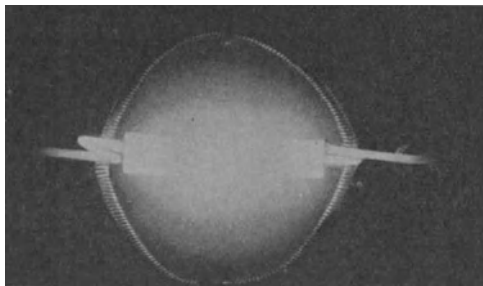


Abb. 41. Lichtbogen der Osram-Solarca-Lampe von unten gesehen

abzuhelfen, sind zur Bestrahlung von Einzelpersonen vor mehreren Jahren die sogenannten Osram-Vitalux-Lampen entwickelt worden. In den genannten Fällen einer Raumdurchflutung mit sonnenähn-

lichem Licht ist aber oft eine stärkere Ultraviolettstrahlung erwünscht, wie sie durch die Vereinigung von Glühlampen und Gasentladungslampen erzielt werden kann. Es ist daher vorgeschlagen worden, bei der Einrichtung von Sonnenscheinräumen Glühlampen mit Hochleistungsröhren, und zwar Quecksilberdampflampen in ultraviolettdurchlässigen Röhren (Abb. 38), zu kombinieren. Durch die Röhren wird dann in der Hauptsache eine zusätzliche Ultraviolettintensität der gesamten Strahlung beigemischt, so daß eine starke biologische Wirkung auftritt. Die Begrenzung des Ultraviolettbereichs auf die biologisch wirksamen Wellenlängen ist bei Verwendung von UV-Glas ebenfalls besonders günstig (Abb. 39). Für ausgesprochen therapeutische Bestrahlung (intensives Ultraviolett gemischt mit Licht- und Wärmestrahlung) muß an dieser Stelle auch die Osram-Solarca-Lampe genannt werden, die eine geschickte Vereinigung eines Wärme- und Lichtstrahlers (Wolfram Elektroden) mit einem Ultraviolettstrahler (Quecksilberhochdruckentladung) darstellt (Abb. 40, 41, 42 und 43).

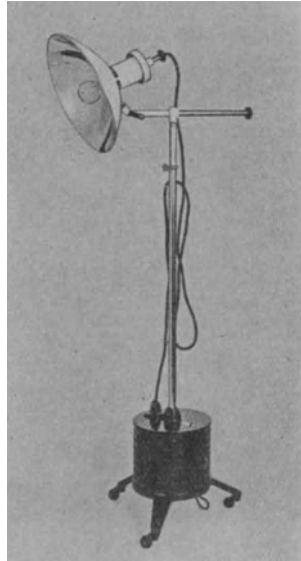


Abb. 42. Osram-Solarca-Strahler mit Solarca-Lampe

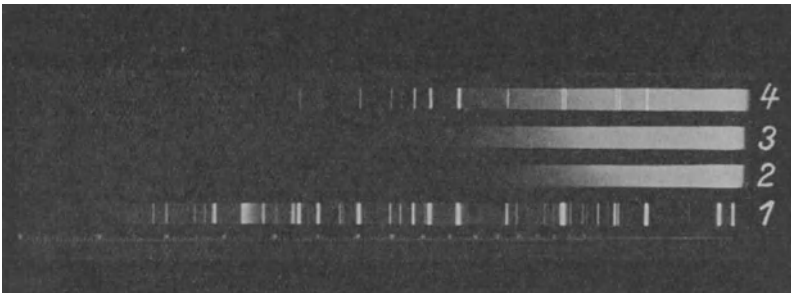


Abb. 43. Spektrum der Osram-Solarca-Lampe im Vergleich mit anderen UV-Strahlern
1. Quarz-Hg-Lampe, 2. Nitra-Lampe, 3. Vitalux-Lampe, 4. Solarca-Lampe

Die ausgesprochene Farbigkeit des Lichtes der Leuchtröhren ist zunächst für die Zwecke der Allgemeinbeleuchtung von Nachteil. Auf vielen Sondergebieten der Allgemeinbeleuchtung tritt aber die Farbigkeit des Lichtes gegenüber anderen Aufgaben teils erheblich zurück, teils als besonders wertvolle Eigenschaft in den Vordergrund. Das erste ist z. B. der Fall bei der Straßenbeleuchtung, bei der es naturgemäß nicht immer auf die richtige Farbwiedergabe ankommt. Auf diesem Gebiet werden sicherlich die Natrium- und Quecksilberdampf lampen dank ihrer ausgezeichneten Lichtausbeute Verwendung

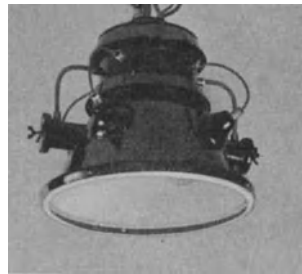
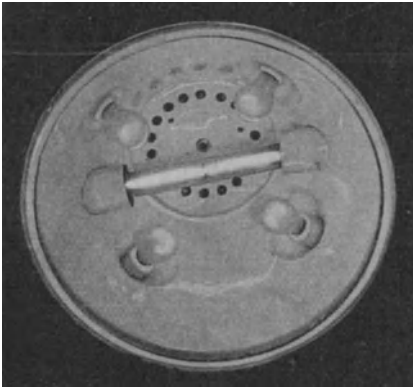


Abb. 44. Verbundstrahler.

Straßen- und Fabrikleuchten mit Quecksilberhochdruckröhren und Glühlampen

finden können, jedenfalls haben die bisherigen Versuche ein sehr befriedigendes Ergebnis gehabt (Abb. 44). Im übrigen haben die Versuche gezeigt, daß besonders bei Verwendung reiner Natriumdampfstrahlung z. B. eine ausgezeichnete Autostraßenbeleuchtung möglich ist, wobei die Straßenbenutzer vielfach den Eindruck haben, bei dieser Beleuchtung leichter und müheloser erkennen zu können (Abb. 45). Ein Beispiel der zweiten Art ist das Gebiet der Fabrikbeleuchtung, bei der es z. B. bei der Bearbeitung von Werkstücken darauf ankommt, feinere Einzelheiten, wie Haarrisse, zu erkennen. Dies ist infolge der Beschaffenheit unseres Auges durch das Vorhandensein des sogenannten chromatischen Fehlers bei Beleuchtung mit einfarbigem Licht besser möglich als bei weißem Licht.

Hier kommt eine Verwendung von Natrium- oder Thalliumröhren, also gelbem oder grünem monochromatischen Lichtes als Arbeitsplatzbeleuchtung in Frage, um die Leistung bei solchen besonders feinen Arbeiten zu steigern. Den unangenehmen Eindruck, den psychologisch die Farbe einer derartigen Beleuchtung auf den

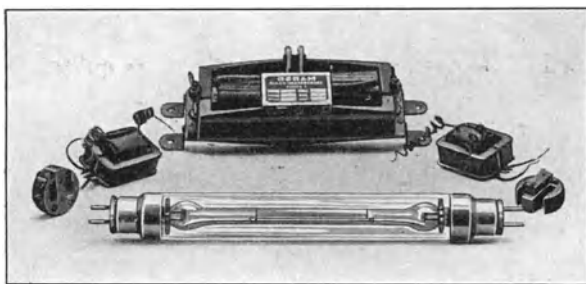
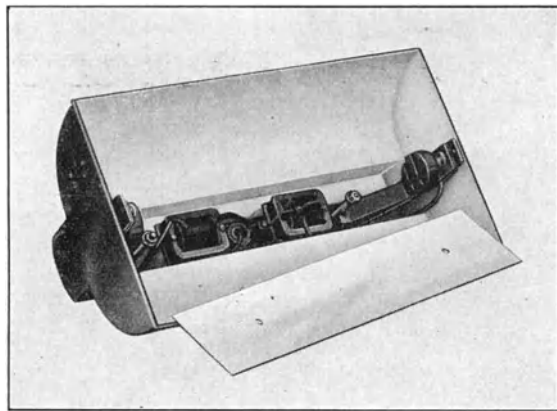


Abb. 45. Natriumleuchtröhren in Straßenleuchten

Menschen macht, kann man dadurch mildern, daß man eine schwache Allgemeinbeleuchtung mit Glühlampen mit der genannten Arbeitsplatzbeleuchtung verbindet. Derartige Anlagen sind seit längerer Zeit in Amerika in Betrieb; es wurden ganze Fabrikgebäude ohne Fenster ausgeführt und mit Kombinationsstrahlern beleuchtet. In der „Simonds Saw and Steel Company“ in Pittsburgh werden an 700 Verbundsstrahler, und zwar Quecksilberdampflampen mit vier

bzw. acht Glühlampen 75 bzw. 50 W, mit Gesamtleistungsaufnahmen von 650 bzw. 850 W verwendet. (Abb. 46). Die Lampen haben eine Lichtleistung von 8200 Hefnerlumen und ergeben eine Beleuchtungsstärke auf den Arbeitsplätzen von 335 Lx. In Europa sind Versuche der gleichen Art von den Firmen Osram und Philips ausgeführt worden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet, auf dem die Farbigkeit des Lichtes der Leuchtröhren besonders wertvoll ist, ist das der Bühnenbeleuchtung. Die erforderlichen Farbeffekte werden bei der Bühnenbeleuchtung bisher entweder durch Glühlampen mit farbigen

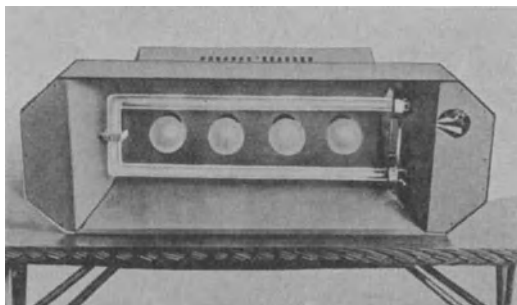


Abb. 46. Amerikanische Kombinationsleuchte, wie sie in der „Fabrik ohne Fenster“ verwendet wird

Kolben oder aber durch Farbfilter, die vor normale Glühlampen oder Bogenlampen gesetzt werden, erreicht. Beides bedingt einen sehr schlechten Wirkungsgrad, da die Absorptionsverluste in den Filtern zum Teil außerordentlich groß sind (Tabelle V, S. 53).

Hier kann durch Anwendung der Hochleistungsröhren die Wirtschaftlichkeit ganz erheblich vergrößert werden, da man bei ihnen zum Teil auf die Filter ganz verzichten, zum Teil die Verwendung von Farbfiltern so wählen kann, daß die Lichtausbeute der neuen Röhren eine ganz erhebliche Steigerung gegenüber den bisherigen Lampen erfährt. Als Beispiel für die Art der Verwendung sei hier nur die Anwendung von Quecksilberdampf röhren erwähnt. Das weißlichblaue Licht dieser Röhren setzt sich aus gelben, grünen und blauen Linien zusammen. Durch Verwendung von entsprechenden

Gelb- oder Grünfiltern kann man also gelbe und grüne Lichter guter Wirtschaftlichkeit erzielen. Auch die Verwendung von Cadmium- und Zink-Gasentladungsröhren scheint in dieser Richtung besonders gute Ergebnisse zu ermöglichen. Zink gibt eine hellblaue Farbe, die sich besonders zur Erzeugung des sogenannten Himmelsblau eignet, das Cadmium strahlt blaugrün, und da beide Röhren überdies auch noch viel Rot enthalten, so werden sie in geeigneter Kombination speziell für Bühnenbeleuchtungszwecke weitgehende Anwendung finden können.

Im vorstehenden sind Beispiele für die vielseitige Anwendung der Leuchtröhren auf verschiedensten Gebieten der Beleuchtungstechnik gegeben. Wenn es sich hierbei auch bisher stets nur um Versuche handelt, so lassen die Ergebnisse doch schon erkennen, daß Möglichkeiten bestehen, die den Rahmen der Anwendung der bisherigen Hochspannungsluchtröhren bei weitem übersteigen und wahrscheinlich alle Gebiete der

Beleuchtungstechnik mehr oder weniger beeinflussen werden. Über diesen Kreis der beleuchtungstechnischen Anwendung hinaus sind die Hochleistungsleuchtröhren aber geeignet, in großem Ausmaße für wissenschaftliche und technische Zwecke Anwendung zu finden.

Zunächst sind sie die gegebenen Strahler für monochromatisches Licht. Bei allen wissenschaftlichen und technischen Arbeiten mit optischen Instrumenten, bei denen monochromatisches Licht notwendig ist, wie z. B. die Feststellung der Drehung der

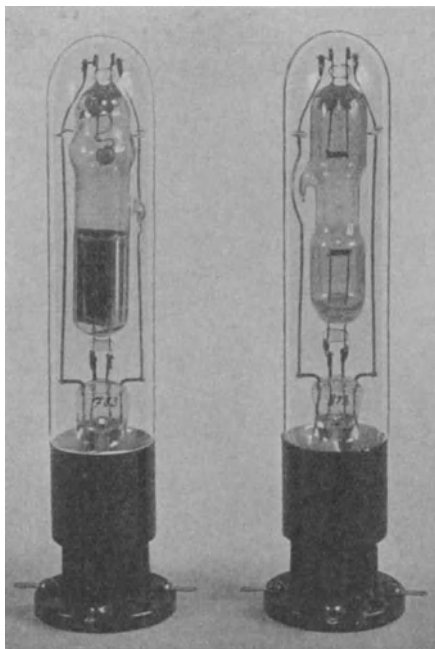


Abb. 47. Natrium-Kleinlampe für Gleich- und Wechselstrombetrieb

Polarisationsebene von Lösungen, wie sie in der Zuckerindustrie zur Feststellung der Konzentration von Zuckerlösungen ausgeführt werden, benutzte man bisher vornehmlich die gelben Linien des Natriums. Man verwendete einen Bunsenbrenner, bei dem in die Flamme Natriumsalze eingeführt werden, und zwar entweder durch auf-

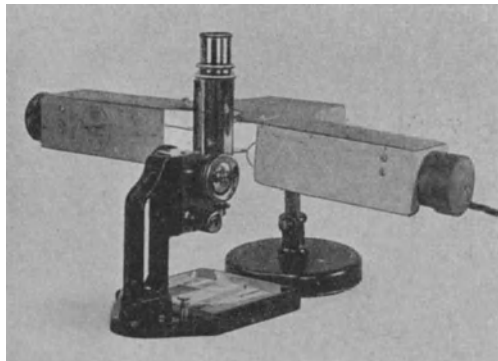
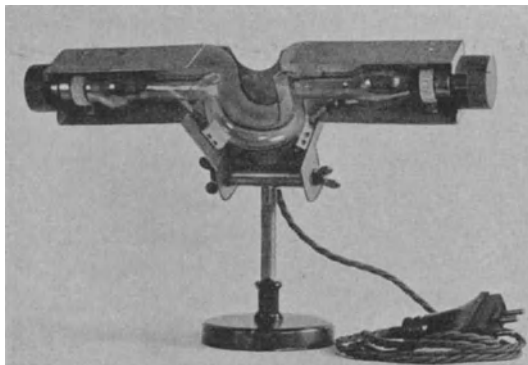


Abb. 48. Hochleistungsröhre für Mikroskopbeleuchtung

gesetzte mit Natriumsalz getränkte Asbestringe oder durch besondere Natrium-Dampfentwicklungsapparate, die mit dem Bunsenbrenner verbunden werden. Bei diesen Natriumbrennern ist es störend, daß während der Messungen zur Konstanthaltung der Lichtintensität nachreguliert werden muß, und außerdem ist die Leuchtdichte sehr klein, so daß man immer mit geringen Intensitäten arbeiten mußte.

Alle diese Nachteile vermeidet eine Natrium-Kleinlampe (Abb. 47), die durch Monochromasie, Konstanz der Lichtintensität und hohe Leuchtdichte ausgezeichnet ist. Des weiteren wird monochromatisches Licht bei allen solchen wissenschaftlichen und technischen Meßverfahren benötigt, bei denen Interferenzen beobachtet werden. Hier hat sich die Cadmiumlampe bereits ebenfalls ausgezeichnet bewährt. Entsprechend ist mit Erfolg versucht worden, durch monochromatische Beleuchtung das Auflösungsvermögen von optischen Apparaten, insbesondere von Mikroskopen, zu steigern. Die Verhältnisse liegen hier ebenso wie in dem oben erwähnten Fall der Werkstattbeleuchtung, bei dem monochromatisches Licht die Erkennbarkeit erhöht (Abb. 48). Ein Gebiet, für das die Linienspektren der Leuchtröhren besonders geeignet sind, ist schließlich die Eichung der Wellenlängenskala von Spektralapparaten. Hier hat sich in Anlehnung an die spektroskopische Tradition eine Eisen-Edelgaslampe gut bewährt (Abb. 49).

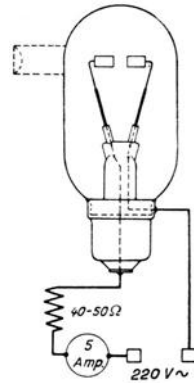


Abb. 49.
Eisen-Edelgaslampe

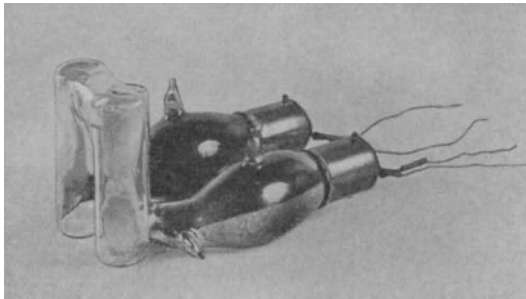


Abb. 50. Natrium-Fernsehlampe

Eine technisch besonders bedeutungsvolle Anwendung hat die hohe Lichtausbeute der Natriumlampe auf dem Gebiet der Fernstechnik gefunden. Hier handelt es sich um die Aufgabe, eine ge-

gebene Leistung möglichst trägheitsfrei in Licht großer Leuchtdichte umzusetzen, wofür die Natriumlampe unter besonders ökonomischen Betriebsbedingungen Anwendung finden kann (Abb. 50 und 51).

Außer für die genannten Zwecke haben die Hochleistungsröhren noch eine Fülle von anderen Anwendungen gefunden, wie z. B. als photographische Aufnahmelichtquellen, als Lichtquellen für Ultrarot-

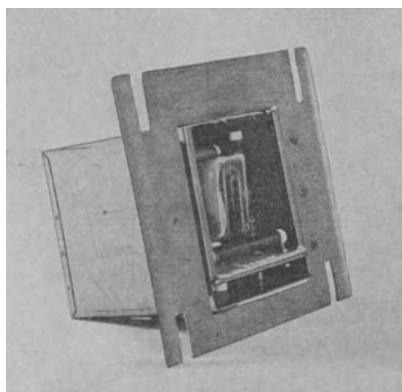


Abb. 51. Natrium-Fernsehlampe im Heizkasten montiert

telephonie, für pyrometrische und kolorimetrische Normalien und dergleichen mehr. Auch eine große Zahl der mannigfachsten Schaltungen benutzt die Hochleistungsröhren in verschiedensten Ausführungsformen. Auf alle diese Verwendungsgebiete im einzelnen einzugehen, würde im Rahmen dieser allgemeinen Übersicht zu weit gehen, zumal über diese Einzelfragen Sonderveröffentlichungen vorliegen.

Anhang

Physikalische Grundlagen der Gasentladung

Die Anschauungen über die physikalischen Vorgänge in einer Gasentladungsstrecke haben sich in den letzten Jahren so weit geklärt, daß es wünschenswert ist, die Erscheinungen nach einheitlichen Gesichtspunkten zusammenzufassen und damit gleichzeitig den Versuch zu machen, eine eindeutige Terminologie an Stelle der bisher ganz uneinheitlichen Bezeichnungsweise zu setzen. Im folgenden wird eine Zusammenstellung der Elemente der Gasentladung, ihrer Wechselwirkung aufeinander sowie der aus diesen sich ergebenden Folgerungen für den Mechanismus der Entladung gegeben. Zu diesem Zweck werden zunächst die Elemente der elektrischen Gasentladung behandelt werden, daran anschließend die Wechselwirkung zwischen den Atomen und Elektronen und schließlich der Mechanismus der elektrischen Gasentladung.

1. Die Elemente der elektrischen Gasentladung

An einer elektrischen Gasentladung sind Lichtquanten, Elektronen, Atome, Moleküle und schließlich feste Körper, wie die Gefäßwandungen und die Elektroden beteiligt, und ein wesentliches Kennzeichen jeder Gasentladung ist die intensive Wechselwirkung zwischen diesen Elementen. Um diese Wechselwirkungen beurteilen zu können, sollen zunächst einige grundlegende Einzelheiten der genannten Elemente zusammengestellt werden.

Lichtquanten sind Elementarquanten elektromagnetischer Strahlung; es sind die kleinsten Beträge, in denen elektromagnetische Strahlungsenergie auftritt. Die jeweilige Größe der Strahlungsenergie E_γ , von der Schwingungszahl ν ist von dieser bzw. von der Wellenlänge λ abhängig, und zwar ist $E_\gamma = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, wenn h das Plancksche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit sind, also $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ Erg sec und $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm sec⁻¹. Dieses Quantengesetz der Energie gilt über den Rahmen der elektromagnetischen Strahlung hinaus überhaupt für alle periodisch verlaufenden Vorgänge, die man deshalb auch häufig als „gequantelt“ bezeichnet.

Elektronen sind negativ elektrische Elementarladungen, gebunden an Teilchen von endlicher Ausdehnung und Masse. Die Größe der Ladung e beträgt $4,77 \cdot 10^{-10}$ E. S. E., die der Masse m $0,9 \cdot 10^{-27}$ g. In einem elektrischen Felde werden also die Elektronen nach der Anode hin beschleunigt und es gilt $\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot V$, wenn v ihre Geschwindigkeit und V die Spannungsdifferenz ist, die sie durchlaufen haben. Die Geschwindigkeit v wird deshalb auch oft in elektrischen Spannungseinheiten durch \bar{V} gemessen, also die kinetische Energie der Elektronen in Volt angegeben und als „Voltgeschwindigkeit“ bezeichnet.

Protonen sind die Träger der positiven elektrischen Elementarladung; diese ist ihrem Betrage nach gleich der des Elektrons, ihre Masse M dagegen ist 1847mal so groß, wie die eines Elektrons.

Atome bestehen aus einem positiv elektrisch geladenen Kern, der seinerseits wiederum aus Protonen und Elektronen zusammengesetzt ist, derart, daß ein — ganzzahliger — Überschuß an positiver Ladung zurückbleibt, der im neutralen Atom durch „äußere“ Elektronen ausgeglichen ist; das einfachste Atom, Wasserstoff, besteht aus einem Proton und einem äußeren Elektron. (Anschauliches Bild des Atomaufbaues, s. S. 11.) Die Elektronen im Atom haben eine Eigenrotation und dementsprechend ein magnetisches Eigenmoment, ein sogenanntes „Spin“.

Das Atom, und zwar im wesentlichen der Atomkern hat eine Masse, die etwa das 10^4 - bis 10^6 -fache der Masse des Elektrons beträgt. Jedes Atom hat die Fähigkeit, Energie in sich aufzunehmen, zu „absorbieren“; setzt man es z. B. elektromagnetischer Strahlung aus, so kann es in einen energiereicheren „angeregten Zustand“, übergehen (in unsrem Geleemodell S. 11 würden solche Übergänge Änderungen der Gestalt des Geleeklumpens bedeuten). Diese „Anregung“ kann aber auch durch Übertragung kinetischer Energie von einem genügend schnellen Teilchen geschehen (s. unten). Von der Anregung durch Elektronenstoß her bezeichnet man diese Energien auch als „Anregungsspannung“. Ein solcher angeregter Zustand ist aber nicht beständig, sondern hat eine gewisse mittlere Lebensdauer, eine sogenannte „Verweilzeit“, die außerordentlich kurz ist (10^{-9} bis 10^{-6} sec, bei sogenannten metastabilen Zuständen etwa 10^{-4} bis 10^{-1} sec), nach welcher das Atom wieder in den unangeregten Grundzustand zurückkehrt, wobei dann die absorbierte Energie meist wieder vollständig abgestrahlt wird. Stößt das Atom innerhalb der Verweilzeit mit einem anderen Teilchen zusammen, so kann es seine Anregungsenergie abgeben. Es hat sich nun gezeigt, daß die Atome nur Strahlung bestimmter Wellenlänge absorbieren können. Sie besitzen ein „Linienspektrum“ (Abb. 52).

Man hat ferner gefunden, daß zwischen den Linien des Atoms oft einfache Gesetzmäßigkeiten bestehen, sogenannte „Seriengesetze“, und daß man die Absorption stets soweit treiben kann, daß ein bzw. mehrere Elektronen das Atom verlassen. Diese Tatsache hat zu der Anschauung geführt, daß jede Absorption mit einer Änderung des Elektronenaufbaues im Atom, mit einem Elektronensprung verbunden ist. Die Abtrennung von Elektronen heißt „Ionisation“ (s. S. 12), und der zurückbleibende Rest des Atoms ist dann positiv geladen, und zwar um so stärker, je mehr Elektronen das Atom verlassen haben. Der Atomrest, das Ion, kann somit ebenfalls im elek-

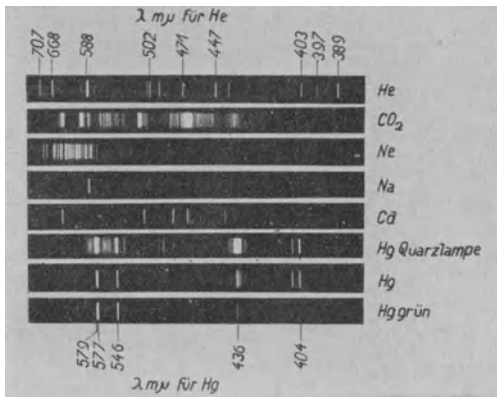


Abb. 52. Einige typische Linien- und Banden-(CO₂)Spektren

trischen Feld beschleunigt werden, und zwar nach der Kathode hin. Es gilt dann die gleiche Beziehung wie für die Elektronen, nämlich $\frac{m \cdot v^2}{2} = Z \cdot e \cdot V$, wenn Z die Anzahl der Elektronen bedeutet, die das Atom verlassen haben. Da die Masse eines Ions aber etwa 10^4 - bis 10^6 mal so groß wie die Masse eines Elektrons ist, so wird in demselben elektrischen Felde ein Ion um $\frac{1}{100}$ bis $\frac{1}{1000}$ langsamer bewegt werden als ein Elektron (s. S. 12).

Im einfachsten Fall, der bei den Elementen der Gruppen 1 bis 3 des periodischen Systems verwirklicht ist, geht die Änderung des Elektronenaufbaues im Atom hauptsächlich auf Übergänge eines einzelnen Elektrons, des „Valenz- oder Leuchtelektrons“ zurück. Dieses Elektron kann gegenüber dem Atomkern und den übrigen Elektronen gewisse diskrete Energiewerte annehmen, deren Beträge durch die sogenannten vier Quantenzahlen festgelegt sind, die auch als „angeregte Zustände“, „Terme“ oder „Niveaus“ bezeichnet

werden. Eine sehr bequeme und anschauliche Darstellung dieser Energiewerte gibt das sogenannte „Termschema“ des Atoms. In einem solchen Termschema (Abb. 53) sind die Energiebeträge graphisch dargestellt, die beim Übergang des Atoms aus einem Zustand in irgendeinen der verschiedenen anderen möglichen Zustände aufzuwenden sind bzw. abgegeben werden. Die verschiedenen Energieniveaus sind hierbei kolonnenartig angeordnet, wobei die Zahl der Kolonnen in bestimmter Weise mit zunehmender Energie zunimmt. Die vom Atom ausgestrahlten Linien werden durch die Verbindungslinien zwischen den Termen dargestellt, wobei die Wellenlänge der ausgestrahlten Linie gegeben ist durch $\lambda = \frac{E_1 - E_2}{h \cdot c}$, wenn E_1

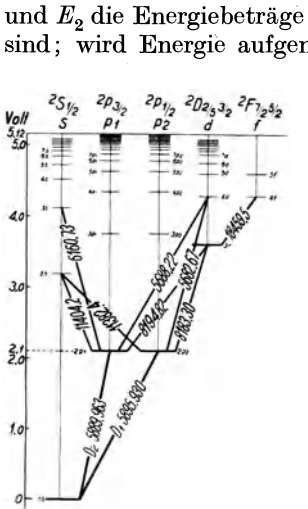


Abb. 53.
Termschema des Natriums

und E_2 die Energiebeträge der beiden in Betracht kommenden Terme sind; wird Energie aufgenommen, d. h. absorbiert, so ist E_2 größer als E_1 . Trägt man im Termschema die Terme in Abständen proportional ihrer Energie auf, so gibt der senkrechte Abstand zweier Terme bis auf einen konstanten Faktor die Wellenlänge der Linie, die beim Übergang von dem einen Niveau zu dem anderen ausgestrahlt wird. Wie intensiv eine Linie dabei auftritt, hängt außer von einer Atomkonstanten, die die Stärke der Linie charakterisiert und gleich dem reziproken Wert ihrer Lebensdauer ist, noch davon ab, wie viele Atome gerade in einem Zustande sind, der zur Absorption bzw. Emission der betreffenden Linie führen kann. Da normalerweise fast alle Atome sich im Grundzustand befinden, werden zunächst nur die vom Grundzustand ausgehenden Linien auftreten. Die langwelligste dieser Linien, die also einem Übergang zu dem Term mit der kleinsten Energie gegenüber dem Grundzustand entspricht, heißt „Resonanzlinie“. Die zu ihrer Anregung erforderliche Energie heißt im besonderen „Anregungsspannung“ (Abb. 54). Bei Gasentladungen kommt es aber vor, daß auch angeregte, besonders metastabile Niveaus mit genügend vielen Atomen besetzt sind, so daß man Absorption von angeregten Niveaus aus erhält.

In dem Termschema (Abb. 53) ist ersichtlich, daß nicht alle möglichen Verbindungslinien zwischen den Termen gezeichnet sind. Es existieren nämlich gewisse „Auswahlregeln“ über das Verhalten des Atoms beim Übergang von einem Term zum anderen, die einen

Teil dieser Verbindungen verbieten. Dieses „Verbot“ besteht darin, daß die Intensität der verbotenen Linien etwa 10^6 mal kleiner ist als die der erlaubten. Unter besonderen Umständen — z. B. in starken Feldern — können diese „Verbote“ zum Teil aufgehoben werden, so daß nunmehr auch die sogenannten „verbotenen“ Linien beobachtbar werden.

Wie man weiter aus dem Termschema ersehen kann, „konvergieren“ die Niveaus eines Atoms alle nach ein und derselben Grenze: Sie häufen sich in der Nähe eines bestimmten Wertes: der „Ionisierungsspannung“ (s. S. 12). Wie man erfahrungsgemäß festgestellt hat, kann jedoch auch Strahlung jenseits der Seriengrenze noch absorbiert werden. Das entspricht dem Umstand, daß ein

	Anregungs- Spannung Volt	Ionierungs- Spannung Volt		Anregungs- Spannung Volt	Ionierungs- Spannung Volt
He	19.4	24.6	Li	1.84	5.37
Ne	16.6	21.5	Na	2.1	5.1
Ar	11.6	15.4	K	1.6	4.32
Kr	9.9	13.3	Rb	1.5	4.16
Xe	8.3	11.5	Cs	1.4	3.7
H ₂	11.1	16	Mg	2.7	7.6
H	10.1	13.5	Zn	4	9.35
N ₂	7.9	16.5	Cd	3.8	9
O ₂	6.1	14.2	Hg	4.7	10.4
CO	6	14.2	Ga	3.1	5.97
			Jn	3	5.74
			Tl	3.27	6.08

Abb. 54. Die Anregungs- und Ionisierungsspannungen der wichtigsten Gase und Dämpfe

Elektron das Atom mit einer von 0 verschiedenen Geschwindigkeit v , d. h. mit kinetischer Energie verlassen kann. Man hat also außer der Ionisierungsspannung $V = h\nu_0$ noch einen Betrag $\frac{m \cdot v^2}{2}$ aufzuwenden, entsprechend einer absorbierten Frequenz, die gegeben ist durch: $h\nu = h\nu_0 + \frac{m \cdot v^2}{2}$. Da die kinetische Energie des herausfliegenden Elektrons keiner Quantelung unterliegt, kann ein „Kontinuum“ von Frequenzen absorbiert werden (Photoionisation).

Die Umkehrung dieses Vorganges, die „Rekombination“, tritt dann ein, wenn ein Elektron mit kinetischer Energie von dem ionisierten Atom „eingefangen“ wird. Es wird hierbei die Energie $h\nu = h\nu_0 + \frac{m \cdot v^2}{2}$ frei, man erhält daher ein sich an die Seriengrenze anschließendes kontinuierliches Spektrum.

Moleküle bestehen aus zwei oder mehreren Atomen bzw. Ionen oder angeregten Atomen. Die Moleküle haben außer der inneren Energie der Elektronensprünge noch die Möglichkeit, Energie durch Bewegung der einzelnen Atomkerne gegeneinander bzw. Rotation des ganzen Gebildes aufzunehmen; sofern diese Bewegung periodisch ist, gibt sie zu gequantelten Niveaus Veranlassung, die sich, wie aus dem Spektrum ersichtlich, den Elektronenniveaus überlagern.

Das Spektrum eines Moleküls unterscheidet sich dadurch von dem eines Atoms, das nicht, wie beim Atom, nur die den einzelnen Elektronenübergängen entsprechenden Linien auftreten, sondern infolge der genannten Kernbewegung jedes der in Frage kommenden Elektronenniveaus in eine große Zahl von Teilniveaus zerfällt und demzufolge statt der einzelnen Linie eine Vielheit von Linien mit einer gewissen Häufungsstruktur auftritt, ein sogenanntes Bandensystem entsteht (Abb. 52). Hat das Molekül ein elektrisches Moment, was also z. B. der Fall ist, wenn es aus Ionen besteht, so ist mit seiner Bewegung die Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen verknüpft, so daß die Kernbewegung für sich allein ein Spektrum liefert; da die Massen (die Ionen besitzen ja die Masse der Atome) verhältnismäßig groß, die Bindungskräfte verhältnismäßig klein sind, sind die Frequenzen also dementsprechend klein (wie man z. B. aus der Frequenzformel für ein mechanisches Pendel ersehen kann) und so liegt dieses Spektrum meist im Ultraroten.

Da die für die Frequenz (Energie) maßgeblichen Bindungskräfte oft von dem Elektronenaufbau des Moleküls abhängig sind, kann sich bei einem Elektronensprung, also bei Absorption bzw. Emission von Energie, die Frequenz der Kernbewegung und damit ihre Energie ändern; das hat oft zur Folge, daß die im Elektronensprung absorbierte Energie nicht wieder vollständig emittiert wird, sondern zum Teil als Kernbewegung verbleibt (Stokessche Regel). Das ist dann gleichbedeutend mit einer Erwärmung des Gases. Fortschreitende Energieaufnahme kann bei den Molekülen in der gleichen Weise wie bei Atomen zur Ionisation führen, es kann aber auch eine Dissoziation eintreten, das Molekül also in seine Atome zerfallen.

Feste Körper verhalten sich spektroskopisch wie ein Molekül aus sehr vielen Atomen; die Absorption ist vor allem durch ihren Gitteraufbau bedingt, wobei zwischen den metallischen Leitern und den Halbleitern und Isolatoren zu unterscheiden ist.

Die metallischen Leiter enthalten freie Elektronen im Atomgefüge, welche die Leitung besorgen. Die Herkunft dieser freien Elektronen kann man sich so erklären, daß beim Übergang aus der gasförmigen zur flüssigen metallischen Phase die Metallatome ihre Valenzelektronen ganz oder zum Teil abgeben. Das Metall setzt sich demnach aus Ionen und freien Elektronen zusammen, wobei die freien

Elektronen den Zusammenhalt der Ionen übernehmen. Optisch haben die Metalle meist eine kontinuierliche sehr starke Absorption, sie sind undurchsichtig.

Der Vollständigkeit wegen sei bemerkt, daß bei geeigneter Behandlung die Leitungselektronen das Material verlassen können. So findet z. B. bei Beschießung mit Elektronen, Atomen, Ionen und dergleichen eine „sekundäre Elektronenemission“ statt; wird das Metall erhitzt, so erfolgt von einer gewissen Temperatur an eine „thermische Elektronenemission“ und endlich bei Bestrahlung mit Licht eine „Photoelektronenemission“. Die thermische Emission ist besonders stark bei den Erdalkalien, die Photoemission bei den Alkalien.

Im Gegensatz zu dem metallischen Leiter stehen die „Halbleiter“ und „Isolatoren“. Sie besitzen optisch eine selektive Absorption, die meist wesentlich schwächer ist, und sind bezüglich ihrer Elektronenemission wesentlich inaktiver. Eine Sonderstellung nehmen die sogenannten fluoreszierenden Stoffe und die Phosphore ein (s. S. 55).

2. Die Wechselwirkungen zwischen Atomen und Elektronen

Wie bereits gesagt, werden in einer Gasentladung durch die elektrischen Feldkräfte Vorgänge ausgelöst, die in einer aktiven Wechselwirkung zwischen den im vorigen Abschnitt beschriebenen Elementen bestehen. Von diesen Vorgängen der Wechselwirkung interessieren besonders die zwischen Elektron und Atom, dann aber auch zwischen Lichtquanten und Atomen, auf die bereits eingegangen wurde, und schließlich, wenn auch mehr indirekt, die zwischen Elektronen oder Atomen und festen Körpern.

Die Wechselwirkungen zwischen Elektron und Atom lassen sich in drei Gruppen je nach der Elektronengeschwindigkeit betrachten, und zwar unterhalb der Anregungsspannung, oberhalb der Anregungsspannung und oberhalb der Ionisierungsspannung. Unterhalb der Anregungsspannung, d. h. der Energie, die befähigt ist, die Resonanzlinie des Atoms anzuregen, finden sogenannte „elastische Reflexionen“ statt (s. S. 11), die „Reflexionsverluste“ bedingen. Der Energieverlust pro Elektron und Sekunde ist hierbei proportional

$v_e^3 \cdot \frac{m}{M}$, wobei v_e die Elektronengeschwindigkeit, m die Elektronen-

masse und M die Atommasse ist. Dieser Verlust erklärt sich folgendermaßen: da, wie schon erwähnt (s. S. 69), die Masse des Elektrons sehr klein gegenüber der Masse des Atoms ist, sie aber doch nicht zu vernachlässigen ist, so wird, wenn auch langsam, das Atom durch die Elektronenstöße in Bewegung versetzt. Das Elektron gibt bei der elastischen Reflexion kinetische Energie an das Atom ab. Diese

Energiebeträge sind an sich bei jedem einzelnen Stoß außerordentlich klein, summieren sich aber infolge der großen Zahl der Stöße (10^{16} bis 10^{18} je Sekunde) zu unter Umständen erheblichen Beträgen. Bei der Berechnung der Zahl der Stöße kommt es naturgemäß auf die Größe des Atoms, den sogenannten „Wirkungsquerschnitt“ (W. Q.) an, d. h. den Atomquerschnitt, der sich den Elektronen bestimmter Geschwindigkeit darbietet. Hierbei ist zu bemerken, daß die so bestimmte Größe des Atoms für die einzelnen Wechselwirkungsprozesse verschieden ist; bei den Wechselwirkungen mit Elektronen hängt der W. Q. von der Elektronengeschwindigkeit ab (Abb. 55).

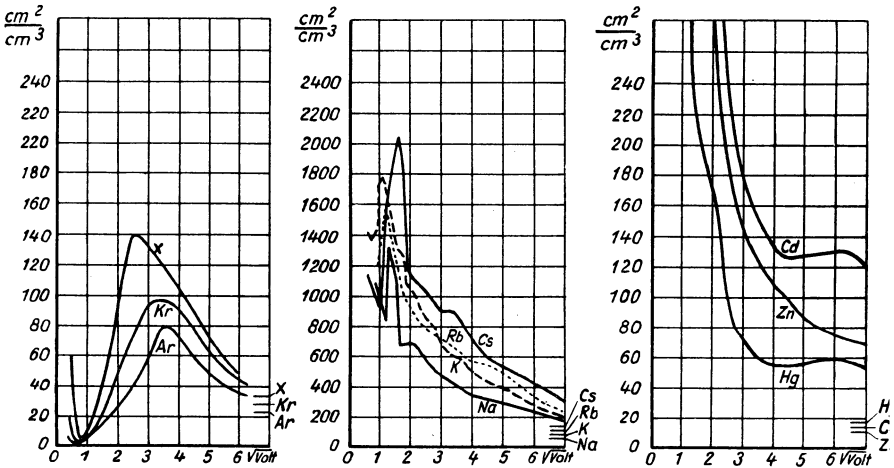


Abb. 55. Wirkungsquerschnitte der Elemente der ersten Gruppen des periodischen Systems

Für die elastische Wechselwirkung zwischen Atomen, wie sie in der kinetischen Gastheorie angenommen wird, ist der W. Q. sehr viel kleiner.

Oberhalb der Anregungsspannung treten „unelastische Stöße“, und zwar zunächst Anregung des Atoms ein. Der W. Q. der Anregung ist dabei von der Größe der Elektronengeschwindigkeit (oberhalb der für die Anregung überhaupt notwendigen Geschwindigkeit) abhängig; diese Abhängigkeit wird durch die sogenannte „Anregungsfunktion“ (Abb. 56) dargestellt. Bei der Anregungsspannung ergibt die Anregungsfunktion für die Anregung den W. Q. 0, ihr Maximum liegt etwa bei dem Wert der doppelten bis dreifachen Anregungsspannung. Für die verschiedenen Linien ist die Form der Anregungsfunktion etwas verschieden, das Maximum ist mehr oder weniger stark ausgeprägt.

Ist die „Ionisierungsspannung“ erreicht, so tritt Ionisation ein. Der W. Q. der Ionisation ist dabei von der Größe der Elektronengeschwindigkeit abhängig; diese Abhängigkeit wird durch die sogenannte „Ionisationsfunktion“ dargestellt (Abb. 57). Normalerweise scheint hierbei die für die verschiedenen Elektronengeschwindigkeiten sich ergebende Ionisation, also die „Ionisationsausbeute“ kleiner zu sein als die entsprechend definierte „Anregungsausbeute“. Lediglich bei Edelgasen scheint das Umgekehrte der Fall zu sein, und daher sind diese Gase wohl auch durch besonders kleine Zündspannungen ausgezeichnet (s. S. 13).

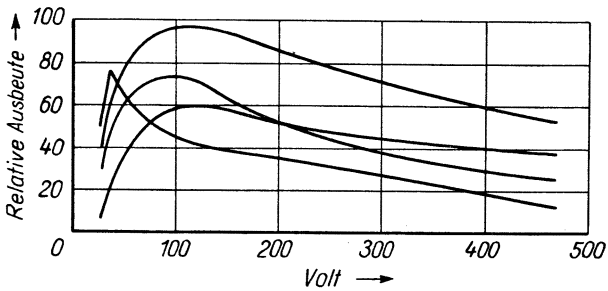


Abb. 56. Anregungsfunktion einiger Heliumlinien
(Anregungsspannung zwischen 20 und 24 V)

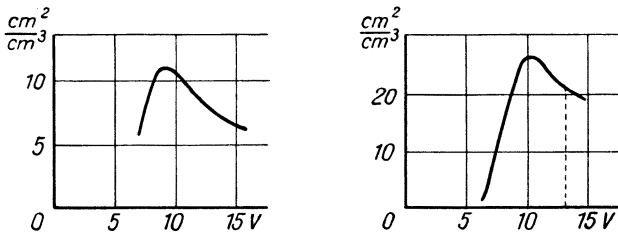


Abb. 57. Ionisationsfunktion für Natrium und Kalium

Diese Wechselwirkungen sind ebenso wie mit normalen Atomen auch mit bereits angeregten Atomen möglich. Man spricht in solchen Fällen auch von stufenweiser Anregung und Ionisation. Wegen der Unbeständigkeit der angeregten Atome sind diese Prozesse allerdings nur in solchen Fällen zu beobachten, in denen sehr viele Atome aus dem Grundzustand angeregt werden.

Die geschilderten Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Atomen sind schließlich auch in ihren Umkehrungen von Bedeutung. Tritt oberhalb der Anregungsspannung Anregung des Atoms ein, so prallt ein Elektron hoher Geschwindigkeit auf ein Atom. Das Atom

wird durch die vom Elektron abgegebene Energie angeregt und das Elektron fliegt mit kleinerer Geschwindigkeit weiter. Umgekehrt kann auch ein Elektron kleiner Geschwindigkeit auf ein bereits angeregtes Atom stoßen. In diesem Fall wird das Elektron Energie aufnehmen, dadurch also mit höherer Geschwindigkeit reflektiert werden und das Atom in den unangeregten Zustand zurückkehren. Man nennt diesen Vorgang einen „Stoß zweiter Art“. Im letzten Falle, in dem die Ionisierungsspannung erreicht ist, spielt sich genau das gleiche ab, nur daß an Stelle der Anregung Ionisation tritt. Das Elektron sehr hoher Geschwindigkeit ionisiert das Atom, d. h. es gibt Energie an das Atom ab, indem es ein Atomelektron herausschleudert, so daß zwei Elektronen kleiner Geschwindigkeit übrigbleiben. Bei der Umkehrung haben wir dann einen sogenannten Dreierstoß, es stoßen zwei langsame Elektronen auf ein Ion, das ein Elektron einfängt, also in den Atomzustand zurückkehrt und die dabei frei werdende Energie dem zweiten Elektron mitteilt, dieses beschleunigt. Man bezeichnet diesen Vorgang der Wiedervereinigung eines Ions mit einem Elektron bei dem geschilderten Dreierstoß als „strahlungslose Rekombination“ im Gegensatz zu der Rekombination, bei der nur ein Elektron aufprallt und vom Ion eingefangen und die freiwerdende Energie abgestrahlt wird (s. S. 71). — Dieser Vorgang stellt die Umkehrung zur Photoionisation dar.

Die zwischen Elektron und Molekül möglichen Wechselwirkungen sind mit den bereits geschilderten identisch, nur kommt als vierter Fall noch die Dissoziation des Moleküls hinzu (s. S. 72), wobei jedoch zu beachten ist, daß bei Molekülen die unelastischen Stöße wegen der Kernbewegungsniveaus schon bei sehr viel kleineren Elektronengeschwindigkeiten einsetzen.

Zwischen Atom und Atom treten dieselben Möglichkeiten auf wie bei der Wechselwirkung von Elektron und Atom, nur sind sie infolge der anderen Massenverhältnisse quantitativ anders. So ist bei „elastischen“ Stößen die übertragene Energie von derselben Größenordnung wie die gesamte kinetische Energie der Stoßpartner gegeneinander. Für den Stoß zweiter Art zwischen Atomen gilt die Regel, daß die Umsetzung von Anregungsenergie in kinetische Energie relativ unwahrscheinlich ist. Die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung wird um so größer, je besser die „Energieresonanz“ ist, d. h. je energetisch näher die Niveaus der Stoßpartner zueinander liegen. Daher haben gleichartige Atome einen sehr viel größeren Wirkungsquerschnitt für Stöße zweiter Art als ungleichartige, bei denen der $W. Q.$ nur etwa von der Größe des gaskinetischen ist.

Bei den Wechselwirkungen zwischen elementaren Bestandteilen und festen Körpern (Wänden, Elektroden) handelt es sich, soweit die Erscheinungen in diesem Zusammenhange von Bedeutung sind,

um Absorption von Lichtquanten, Rekombination von Ionen zu Atomen und von Atomen zu Molekülen, sowie schließlich Energieabgabe schneller oder angeregter Teilchen. Diese Vorgänge bewirken meist eine Erwärmung der Wände oder Elektroden. Unter Umständen tritt noch, hauptsächlich bei Metallen, eine Auslösung von Sekundärelektronen auf, wie noch im folgenden gezeigt werden wird.

An dieser Stelle sei kurz auf die Aussichten einer ökonomischen Lichterzeugung mit Hilfe von Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern eingegangen, wie man sie auf Grund der Eigenschaften der Elemente und der ausgeführten Wechselwirkungen von vornherein feststellen kann, wenn auch diese Frage nicht im direkten Zusammenhang mit den hier betrachteten Erscheinungen bei Gasentladungen steht. Wie wir oben gesehen haben, ist die Anregungsart, die einen 100 %igen Wirkungsgrad zum mindestens theoretisch zuläßt, die geordnete Anregung. An dieser Stelle sei bemerkt, daß der tiefere Grund für die Unterscheidung in ungeordnete und geordnete Strahlung der ist, daß die Temperaturstrahlung im „thermischen Gleichgewicht“ steht, während die Lumineszenzstrahlung nicht im thermischen Gleichgewicht erfolgt. Im Falle des thermischen Gleichgewichts befindet sich die den „Sendern“ zugeführte Energie im Zustande maximaler Ungeordnetheit, während außerhalb des Gleichgewichtes gewisse Energiewerte bevorzugt werden können. Da man ferner weiß, daß selbst im Falle kontinuierlicher Emission der Einzelprozeß quantenhaft vor sich geht und für quantenhafte Prozesse die Beziehung $E = h \cdot \nu$ zwischen Energie und Wellenlänge sinnvoll ist, so folgt aus bevorzugten Energiewerten auch sofort eine Bevorzugung von bestimmten Wellenlängen. Auf diese Weise lassen sich experimentell anwendbare Schlußfolgerungen und Unterscheidskriterien für die beiden Arten der Strahlungserzeugung aufstellen. Voraussetzung für die geordnete Anregung ist, daß sich hochangeregte Atomgruppen bilden und existieren können, deren Energie weit über der mittleren Energie liegt, wie sie der gegebenen Temperatur entspricht.

Betrachten wir ein Gas, das nur aus Atomen besteht, bei einem Druck, bei dem die Zeit zwischen zwei Zusammenstößen im Mittel groß gegen die Lebensdauer der angeregten Zustände ist, so wird bei Anregung der Atome die Anregungsenergie zu 100 % wieder ausgestrahlt werden. Wir haben eine 100 %ige Ausbeute der Lichtanregung. Erfolgt nun in diesem Falle die Anregung durch Elektronenstoß, so hat man eine 100 %ige Umsetzung der Elektronenenergie, also von elektrischer Energie in Licht. Erhöht man die Dichte des Gases, so daß auslöschende Stöße zweiter Art vorkommen, so kann man nicht mehr mit 100 % Umsetzung rechnen, der Nutzeffekt wird kleiner; nun ist aber die Wahrscheinlichkeit von direkter Umsetzung von Anregungsenergie in kinetische Energie sehr klein

(s. S. 76), so daß Atomgase selbst bei sehr hohen Gasdichten immer noch 100 % Ausbeute — wenn andere Verluste vermieden sind — ergeben.

Hat man zweiatomige Moleküle, so ändert sich bereits das Bild. Infolge der stets mehr oder weniger stark vorhandenen Wechselwirkungen zwischen Elektronenenergie und Energie der Kernbewegung wird ein Teil der Anregungsenergie dazu verwandt, die Kernbewegung zu erhöhen, so daß nicht immer die ganze Anregungsenergie abgestrahlt wird (s. S. 72, Stokessche Regel). Der in der Kernbewegung investierte Rest wird bei Zusammenstößen mit anderen Molekülen zerstreut und dient zur Erhöhung der Temperatur des Molekül-gases. Schon aus diesem Grunde ergeben Molekül-gase im allgemeinen einen schlechteren Wirkungsgrad als Atomgase.

Im Falle einer Flüssigkeit, die eine geordnete Anregung zuläßt, ist infolge der noch wesentlich gesteigerten Wechselwirkung und der wesentlich größeren Stoßzahlen die Ausbeute sehr viel kleiner. Es gibt allerdings auch Fälle, z. B. Lösungen von Farbstoffen in zähen Lösungsmitteln, die eine Ausbeute von nahezu 100 % haben, nämlich immer dann, wenn die Zeit der Energiezerstreuung infolge der Zähigkeit des Lösungsmittels groß gegen die Lebensdauer des angeregten Zustandes ist.

Im Falle eines festen Körpers müssen wir zwischen Kristallinen und Metallen unterscheiden. Kristalline, nicht metallische Körper, liefern, sofern sie geordnete Anregung zulassen, eine Ausbeute, die ungefähr gleich der von Flüssigkeiten ist und sich mit abnehmender Temperatur erhöht. Metalle zeigen eine außerordentlich hohe Energiezerstreuung, die durch die sehr starke Wechselwirkung zwischen den Teilchen hervorgerufen wird, so daß die absorbierte Energie restlos in thermische Energie umgesetzt wird. Zusammenfassend läßt sich also sagen, daß Aussicht auf geordnete Anregung immer dann vorhanden ist, wenn die Zerstreuung klein ist, d. h. also, vor allem bei Atomgasen.

Bei thermischer, also ungeordneter Anregung hat der Begriff der Energiezerstreuung keinen Sinn; hier spielen lediglich die optischen Eigenschaften eine Rolle, und es zeigt sich, daß die Substanzen stärkster Energiezerstreuung, wie die Metalle, optische Eigenschaften von der Art haben, daß sie leicht thermisch angeregt werden können. Während man z. B., um Natriumdampf thermisch anzuregen, eine Temperatur von einigen Tausend Grad benötigen würde, da die Anregungsspannung vom Natrium bei 2,4 V liegt, haben die Metalle vom Ultrarot an eine kontinuierliche Absorption, so daß sie bereits bei Temperaturen von 500° zu leuchten beginnen. Bei einigen Metallen ist allerdings diese Absorption bis ins Gelb sehr klein, wie z. B. beim

Kupfer, so daß bei diesem eine ungeordnete Anregung erst bei höheren Temperaturen möglich ist (Kirchhoffsches Gesetz).

In Ergänzung des eingangs Gesagten (s. S. 4) sei bemerkt, daß, wie aus dieser Darstellung ersichtlich, die alte Unterscheidung in Temperaturstrahler und Lumineszenzstrahler nicht ganz des guten Rechtes und Sinnes entbehrt hat.

3. Der Mechanismus der elektrischen Gasentladung

Jede Gasentladung wird eingeleitet durch einen Vorgang, den man die Zündung nennt, und über den bereits oben einiges gesagt wurde. Erforderlich sind einige (etwa 100 cm^3) freie Elektronen zwischen Anode und Kathode der Entladungsstrecke, welche nach der Anode hin beschleunigt werden (s. S. 12 ff.). Dabei tritt, wie hier kurz wiederholt sei, Ionisation der Gasatome durch Stoß auf, wodurch die Zahl der Elektronen sehr stark (exponentiell) zunimmt. Infolge ihrer sehr viel kleineren Geschwindigkeit bleiben die positiven Ionen in der Entladungsstrecke als positive Raumladung zurück und bewirken eine größere Steilheit des ursprünglich linearen Potentialgefälles nach der Kathode hin (Abb. 58). Hierdurch wird das Gebiet starker Stoßionisation wiederum weiter zur Kathode verlegt und so weiter fort, bis schließlich die Raumladungswolke aus positiven Ionen in die unmittelbare Nähe der Kathode gelangt. Die Ionen prallen dann auf die Kathode auf und lösen Sekundärelektronen aus. Damit ist die Entladung „selbständig“ geworden, das Rohr hat „gezündet“.

Es hängt also die Spannung, bei der das Zünden auftritt, von der Wirksamkeit der Ionenbildung ab; es zeigt sich, daß Edelgase niedrige „Zündspannungen“ besitzen (s. S. 75). Die Ausbeute der Ionisierung wird unter Umständen durch Spuren eines Fremdgases weiter verbessert und damit die Zündspannung herabgesetzt (eine brauchbare Gaszusammensetzung ist z. B. Argon und Spuren

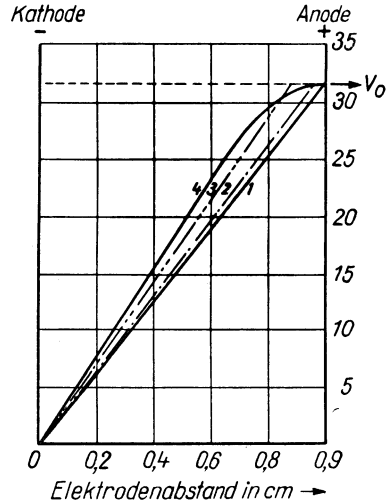


Abb. 58. Ausbildung der positiven Raumladung in dem Zeitintervall von 1...4 nach Anlegung der Spannung V_0 an die Elektroden.

von Quecksilber). Dies tritt jedoch nur und immer dann ein, wenn das Grundgas ein metastabiles Niveau besitzt und die Ionisierungsenergie der Verunreinigung kleiner ist als die des metastabilen Terms. Dies besagt, daß bei Vorhandensein eines Grundgases, dessen Atome ein besonders langlebiges Niveau besitzen, ein Teil der zur Anregung des Grundgases dienenden Elektronenenergie, die also für die Ionenbildung zunächst verloren gegangen war, zurückgewonnen wird, in dem nämlich die metastabilen Grundgasatome bei Stößen mit den Atomen des Zusatzgases dieses ionisieren. Die Geschwindigkeit, mit der die Zündung eintritt, die sogenannte „Aufbauzeit der Entladung“, ist von der angelegten Spannung unabhängig, hängt dagegen immer vom Elektrodenabstand und von der Dichte des Gases ab, und zwar derart, daß hohe Dichten, d. h. hohe erzielbare Ionenkonzentration die Aufbauzeit verkürzen; den gleichen Einfluß übt eine Vergrößerung der Ionisierungsspannung aus, da dann die Feldstärke in der Entladung vergrößert wird.

Geht man von den beobachteten Erscheinungen aus, so gliedert sich eine Entladung im stationären Zustand in das „Glimmlicht“ an den Elektroden und in das dazwischenliegende Leuchten des Volumens, bei röhrenförmigen Gasentladungen in Gestalt der „positiven Säule“. Die Spannungsverteilung in der Entladungsstrecke richtet sich nach charakteristischen Eigenschaften des Gefäßes, des Füllgases und der Elektroden, wobei der Einfluß der drei Faktoren unabhängig voneinander auftritt (z. B. Entladungsröhren mit geheizten Elektroden, bei denen nur das Volumen leuchtet, oder Glimmlampen, bei denen dieses durch kleinen Elektrodenabstand unterdrückt und nur das negative Glimmlicht in Erscheinung tritt, so daß es möglich ist, jeden von ihnen oder auch zwei zu unterdrücken (s. S. 22).

Das Leuchten in der Nähe der Kathode, das negative Glimmlicht, ist vor allem auf die Existenz eines Kathodenfalles zurückzuführen. Seine Größe ist von dem Elektrodenmaterial, dem Füllgas und dem Fülldruck abhängig. Seine Größe ist ein Maß für die kinetische Energie, welche die positiven Ionen haben müssen, um die zur Erhaltung der Entladung notwendige Anzahl von Sekundärelektronen aus der Kathode auszulösen. Die Ausbeute der Erzeugung von Sekundärelektronen durch Ionenstoß bzw. Stoß angeregter oder metastabiler Atome ist schlecht; der Hauptteil der kinetischen Energie der Ionen wirkt sich in Erwärmung der Kathode aus. Steigert man die Belastung der Röhre und damit die der Kathode, so kann sich unter Umständen die Erwärmung der Kathode so weit erhöhen, daß thermische Emission eintritt. Die Entladung zieht sich dabei meist auf einen „Brennfleck“ zusammen und der Kathodenfall geht auf einige Volt herunter. In diesem Brennfleck ist die Erhitzung des Kathodenmaterials sehr erheblich. Trotzdem ist die Elektronen-

emission im Brennfleck oft nicht thermisch, sondern durch die außerordentlich hohen Felder vor der Kathode direkt hervorgerufen (kalte Emission). Wird die Kathode von vornherein so gebaut, daß sie die von der Entladung benötigten Elektronen durch thermische Emission oder für sehr schwache Ströme durch Photoemission liefert, so tritt überhaupt kein nennenswerter Kathodenfall auf, das Kathodenlicht verschwindet.

Auf die Erscheinungen in der Anodengegend, also auf das positive Glimmlicht, braucht in diesem Zusammenhange nicht näher eingegangen zu werden, da es für die Technik der Gasentladungsröhren von untergeordneter Bedeutung ist und alles Wesentliche bereits an früherer Stelle (s. S. 15) ausgeführt wurde.

Das Leuchten im Volumen oder, wie schon erwähnt, bei röhrenförmigen Gefäßen in der positiven Säule geht in Teilen der Entladung vor sich, die mit dem Sammelnamen „Plasma“ bezeichnet werden. Es handelt sich um Gebiete, die nach außen elektrisch neutral sind und außer von normalen und angeregten Atomen, von Ionen, Elektronen und Lichtquanten erfüllt sind. Der Unterschied gegenüber einem normalen Gas ist hierbei nicht scharf abgegrenzt; infolge der thermischen Ionisation und Anregung nimmt jedes Gas bei genügend hoher Temperatur die Eigenschaften eines Plasmas an, die sich von denen eines normalen Gases durch eine viel größere Zahl der möglichen Wechselwirkungen unterscheidet. Das in Gasentladungen vorkommende Plasma unterscheidet sich von diesem „thermischen“ oder „isothermen Plasma“ dadurch, daß die hohe Konzentration angeregter und ionisierter Atome durch das elektrische Feld mittels des Mechanismus des Elektronenstoßes aufrechterhalten wird. Dieses nicht isotherme Plasma hat natürlich etwas andere Eigenschaften als das isotherme Plasma. Im folgenden soll unter Plasma schlechthin stets das „nicht-isotherme“ Plasma verstanden werden. Die äußere Form des Plasmas ist durch die Gefäßabmessungen und die Entladungsbedingungen gegeben und auch seine Eigenschaften zum Teil von diesen abhängig; zum anderen Teil sind sie von der besonderen Art und Form des Plasmas unabhängig und nur durch Dichte des Gases und Höhe der Temperatur bestimmt. Dazu gehören vor allem der Gehalt an elektromagnetischer Strahlung, der sich unter gewissen Bedingungen in einem Volumenleuchten des Plasmas äußert, sowie der Gehalt an elektrisch geladenen Teilchen, Ionen und Elektronen. Infolge der zwischen diesen herrschenden elektrischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte können Schwingungen auftreten, die den elastischen (akustischen) Schwingungen vergleichbar sind und nur in einem anderen Wellenlängen-Bereich liegen. Man bezeichnet diese Schwingungen allgemein als „Plasma-Schwingung“. Sie können entweder auf Dichteänderungen der

Elektronen zurückgehen und liegen dann in einem Frequenzbereich von etwa 10^9 Hertz, oder aber auf solchen der Elektronen und Ionen gemeinsam und liegen dann in einem Frequenzbereich von etwa 10^4 Hertz. Die positive Säule, also das Plasma einer Entladung in einem röhrenförmigen Gefäß, hat gewisse besonders einfache Eigenschaften, die sich aus seiner Symmetrieeigenschaft ergeben. Es handelt sich da vor allem um das längs der Achse der Entladung entsprechend dem linearen Spannungsverlauf konstante Feld¹⁾ und die daraus sich ergebende über die ganze Säule nahezu konstante Elektronentemperatur (s. unten). Bei einem kugelförmigen, die eine oder beide Elektroden umgebenden Plasma hingegen ist die Feldstärke nicht konstant, sondern nimmt nach dem Mittelpunkt der Kugel hin zu. Es ist daher zweckmäßig, gewisse Eigenschaften des Plasmas, wie die Ausbildung der Elektronentemperatur, die Lichtanregung sowie die Energiebilanz, an dem besonders übersichtlichen Fall der positiven Säule zu studieren, wenn auch die anderen Formen des Plasmas lichttechnisch selbstverständlich ebenso von Bedeutung sind. Es darf nicht unerwähnt bleiben, daß diese ideale positive Säule sich hauptsächlich in Metaldämpfen ausbildet. In Molekül- und Edelgasen ist dagegen der konstanten Feldstärke eine zeitlich (angenähert sinusförmige) veränderliche Komponente überlagert, die das bekannte Phänomen der laufenden Schichten ergibt.

Im vollkommenen Vakuum würden sich die Elektronen, im einfachsten Falle, z. B. in einem Plattenkondensator, geradlinig von der Kathode nach der Anode bewegen, wenn wir von der Beeinflussung durch das eigene magnetische Feld des Elektronenstromes absehen. Sobald aber Gasatome vorhanden sind, werden die Elektronen aus ihrer geradlinigen Bahn abgelenkt, sie werden „gestreut“. An Stelle der geradlinigen Bewegung tritt eine kompliziertere Bewegung ein, bei der die Elektronen einmal eine „ungeordnete“ Zickzackbewegung ausführen, zum anderen aber unter dem Einfluß des Feldes in Richtung auf die Anode hinwandern, „diffundieren“. Die Größe der ungeordneten Bewegung hängt im wesentlichen von der Zahl der Zusammenstöße ab, d. h. also, von der Dichte und von dem Wirkungsquerschnitt (s. S. 74) der Gasatome. Die Größe des Wirkungsquerschnittes ist bei Edelgasen von derselben Größenordnung wie der sich aus der kinetischen Gastheorie ergebende Atomquerschnitt; bei Metallen ist er besonders für kleine Elektronengeschwindigkeiten etwa 100- bis 1000mal größer. So ist es verständlich, daß Metaldampfungszusätze zu Edelgasen letztere hinsichtlich ihres Einflusses auf die Gasentladung vollständig verdrängen können, auch wenn der Dampfdruck des Edelgases selbst 1000mal größer

¹⁾ Man nennt diese konstante Feldstärke gemessen in Volt/cm den „Gradienten der positiven Säule“.

ist als der des Metaldampfes. Außer den betrachteten „elastischen“ Zusammenstößen kommen überdies noch in großer Zahl „unelastische“ Zusammenstöße vor, bei denen das Elektron seine kinetische Energie ganz oder zum Teil einbüßt. Über die absolute Ausbeute solcher Zusammenstöße ist fast nichts bekannt. Sie dürfte aber, bezogen auf gaskinetische Stöße, z. B. bei den Alkalien um 100 % betragen, d. h. es dürfte, bezogen auf den Atomquerschnitt der Gastheorie, jeder Stoß zu einer Anregung führen.

Die Energieverluste der Elektronen bei elastischen und unelastischen Stößen bewirken, daß ein Elektron, daß die Strecke Kathode—Anode durchfallen hat, nicht die Geschwindigkeit entsprechend

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot V \quad \text{oder} \quad v = \sqrt{\frac{2 e V}{m}},$$

sondern eine wesentlich kleinere besitzt. Die Erfahrung zeigt, daß sich bei genügend hohem Gasdruck sehr bald eine über die ganze positive Säule hin praktisch konstante mittlere Elektronengeschwindigkeit einstellt. Die Elektronengeschwindigkeiten besitzen dabei, wie man aus Versuchen weiß, eine Gleichgewichts- (Maxwell) Verteilung, und einer solchen kann man nach der Thermodynamik eine bestimmte Temperatur zuordnen. Man spricht daher auch, wenn man die Geschwindigkeit der ungeordneten Bewegung im Auge hat, von einer „Temperatur“ der Elektronen, die im allgemeinen einige Volt oder einige 10000° K beträgt¹⁾. Von dieser Bahngeschwindigkeit der Elektronen ist die der Bewegung der Elektronen in Richtung auf die Anode hin zu unterscheiden. Diese sogenannte „Trift“ der Elektronen, die wesentlich kleiner ist, kann bei Kenntnis der Anzahl der Elektronen aus der Stromstärke oder bei bekanntem Wirkungsquerschnitt und Gradienten, aus ihrer Temperatur berechnet werden.

Die Anregung der Atome und Moleküle in der elektrischen Entladung erfolgt hauptsächlich durch Stoß, d. h. auf Kosten der kinetischen Energie der Stoßpartner sowie manchmal wahrscheinlich auch durch Austausch von Anregungsenergie (sensibilisierte Fluoreszenz, Anregung von Metaldampf-Atomen durch metastabile Edelgasatome). Eine genügend hohe kinetische Energie, die eine Anregung herbeiführen könnte, haben in der Entladung normalerweise nur Elektronen und allenfalls Ionen bzw. Atome, die durch Umladung aus diesen hervorgegangen sind. Da für die Ausbeute der Anregung durch Stoß ein mehr oder minder ausgeprägtes Maximum der kinetischen Energie existiert, sind die Anregungs-

¹⁾ Zur Kennzeichnung der Energie bzw. der Geschwindigkeit eines Elektrons hat man also folgende Größen: v [cm sec⁻¹] = $5,95 \cdot 10^7 \sqrt{V}$ [Volt], $1 \text{ V [Volt]} = 7750^\circ \text{ K}$.

möglichkeiten in verschiedenen Teilen der Entladung entsprechend den verschiedenen dort vorhandenen Geschwindigkeiten der Teilchen verschieden. In der positiven Säule, wo der Gradient größenordnungsmäßig 1 Volt beträgt, haben die Elektronen die zur Anregung von Metallatomen gerade günstigste Geschwindigkeit, während die der Ionen zu gering ist, um merklich zur Anregung beitragen zu können. Im Kathodenfall hingegen ist die Elektronengeschwindigkeit merklich höher; die Anregung durch Elektronenstoß wird also mit schlechter, die Ionisation schon mit wesentlich besserer Ausbeute vor sich gehen. Die Ionen werden dagegen wahrscheinlich gerade die zur Anregung optimale Geschwindigkeit haben, so daß im Kathodenfall Anregung zum Teil durch Ionenstoß anzunehmen ist.

In entsprechender Weise gelingt es auch, das von der positiven Säule ausgesandte Spektrum durch Wahl geeigneter Betriebsbedingungen in seiner Zusammensetzung in gewissen Grenzen zu verändern. Wie oben erwähnt, besitzen angeregte Atome eine mittlere Lebensdauer von etwa 10^{-8} sec. Ist nun die Zahl der Elektronenstöße, von denen ein Atom getroffen wird, wesentlich kleiner als 10^8 je Sekunde, so besteht wenig Aussicht, daß ein bereits angeregtes Atom von einem Elektron getroffen wird. Es wird praktisch jedes angeregte Atom ungestört ausstrahlen, und zwar im wesentlichen die ganze bei der Anregung aufgenommene Energie. Die Linien, die man auf diese Weise erhalten kann, gehen vom Grundzustand aus, also bei den Alkalien und Erdalkalien die „Hauptserie“, bei den Erdmetallen die „Nebenserien“. Da innerhalb dieser Serien die langwelligste Linie, die Resonanzlinie, die weitaus stärkste ist (bei den Alkalien z. B. etwa 30 mal stärker als alle anderen zusammen), wird man unter diesen Bedingungen praktisch ein „Ein-Linien-Spektrum“ erhalten, d. h. die ganze zur Anregung kommende Energie wird in der Resonanzlinie abgestrahlt. Diese Bedingungen lassen sich verwirklichen, wenn man die Stromdichte, die in einem weiten Bereich der Zahl der Elektronenstöße direkt proportional ist, genügend klein wählt.

Ganz anders liegen die Verhältnisse, wenn die Lebensdauer der angeregten Atome bzw. die Zahl der anregenden Stöße größer wird. In diesem Falle wird es ziemlich oft vorkommen, daß ein angeregtes Atom von einem Elektron getroffen wird. Wie oben (S. 75) gezeigt, ergeben sich dann verschiedene Möglichkeiten der Wechselwirkung zwischen dem angeregten Atom und dem Elektron. Erstens kann das Atom weiter Energie aufnehmen, „stufenweise“ angeregt oder ionisiert werden, zweitens kann das Elektron die Anregungsenergie des Atoms übernehmen, also einen Stoß zweiter Art ausführen, durch den der Anregungsvorgang wieder rückgängig gemacht wird. In

beiden Fällen wird die ursprünglich dem Atom mitgeteilte Anregungsenergie nicht abgestrahlt, sondern beim Stoß zweiter Art zur Beschleunigung eines Elektrons, bei stufenweiser Ionisation zur Schaffung eines Ions verwendet; bei stufenweiser Anregung schließlich ermöglicht sie die Ausstrahlung einer „höheren Linie“. Dieser Zustand wird, wie oben erwähnt, um so eher eintreten, je langlebiger ein angeregter Zustand und je größer die Zahl der Elektronenstöße, d. h. die Stromdichte, ist. Bei Atomen, die metastabile Zustände haben (s. oben), wie die Erdalkalimetalle und die Edelgase, tritt dies schon bei sehr kleinen Stromdichten ein. Bei diesen reichern sich die angeregten metastabilen Atome so stark an, daß die von ihnen ausgehenden höheren Linien praktisch das Verhalten von Resonanzlinien haben. Bei den kurzlebigen Alkalien hingegen tritt etwas Ähnliches erst bei wesentlich höherer Stromdichte ein.

Ein Vorgang, der bei größerer Stromdichte die Lebensdauer der angeregten Atome scheinbar vergrößert und damit das Eintreten der geschilderten „sekundären“ Prozesse fördert, ist die Absorption der emittierten Strahlung in der Gasentladung selbst (Reabsorption). Denn hierbei verläßt ein einmal ausgestrahltes Lichtquant nicht die Gasentladung, sondern diffundiert allmählich nach außen, wobei es auf seinem Wege Atome anregt und auf diese Weise die Ausichten eines stufenweisen Prozesses bzw. eines Stoßes zweiter Art erhöht. Wenn man zu höheren Stromdichten übergeht, kann man es auch erreichen, daß das Grenzkontinuum (s. oben S. 71) abgestrahlt wird. Dazu gehört hauptsächlich eine große Zahl von Ionen und Elektronen. Diese Erscheinung wird besonders häufig an den Alkalien und den Erdmetallen beobachtet.

Faßt man nun die Möglichkeiten der Beeinflussung des Spektrums eines Atoms zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

1. Bei kleiner Strom- und Atomdichte tritt fast nur die Resonanzlinie in Erscheinung, die die ganze zur Anregung gelangende Energie ausstrahlt. Liegt die Resonanzlinie im sichtbaren Gebiet, so besteht die Möglichkeit einer sehr ökonomischen Lichterzeugung; dieser Fall ist in den Natrium- und Thalliumlampen verwirklicht.

2. Sind metastabile Zustände der Atome vorhanden, oder ist die Stromdichte groß, so treten stufenweise Prozesse auf, die höhere Linien liefern. Die zugeführte Energie verteilt sich nun mehr auf eine größere Zahl von Linien; dieser Fall hat besondere Bedeutung, wenn die zur Lichterzeugung günstigen Linien von angeregten Zuständen ausgehen. Verwirklicht ist dies bei den Erdalkali-, Magnesium-, Zink-, Cadmium- und Quecksilberdampflampen, sowie bei den Edelgaslampen; zum Teil auch bei Cäsium-, Rubidium- und Thalliumlampen.

Änderung der spektralen Energieverteilung

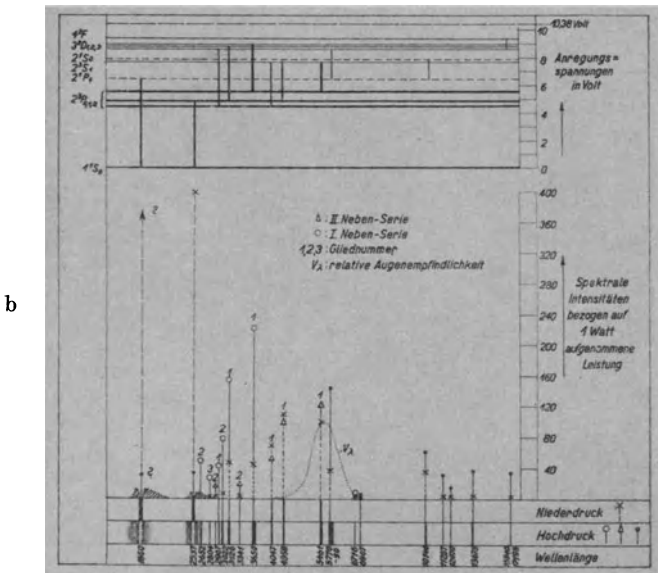
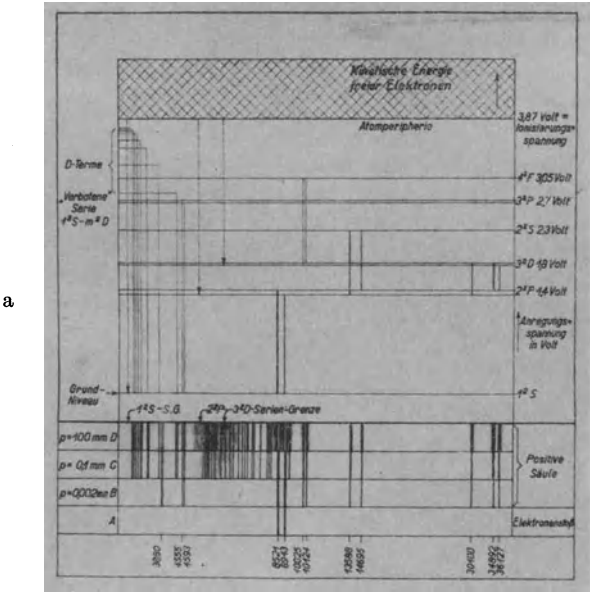


Abb. 59. Änderung der spektralen Energieverteilung mit wachsenden Strom- und Dampfdichten (a für Quecksilber, b für Cäsium)

3. Bei hohen Stromstärken kann schließlich das Grenzkontinuum erscheinen, das stets mit einem stärkeren Hervortreten höherer Serienglieder sowie dem Auftreten verbotener Linien verknüpft ist. Dieser Fall wird bei den Cäsium-, Rubidium- und Thalliumlampen verwirklicht (Abb. 59).

Nachdem wir gesehen haben, wie die Anregungsenergie vom Atom verarbeitet wird, erwächst die Frage, mit welcher Ausbeute überhaupt Strahlung in einer Gasentladung erzeugt werden kann. — In einer Gasentladung kann man von vornherein drei Arten von Vorgängen unterscheiden, die der Gasentladung Energie entziehen.

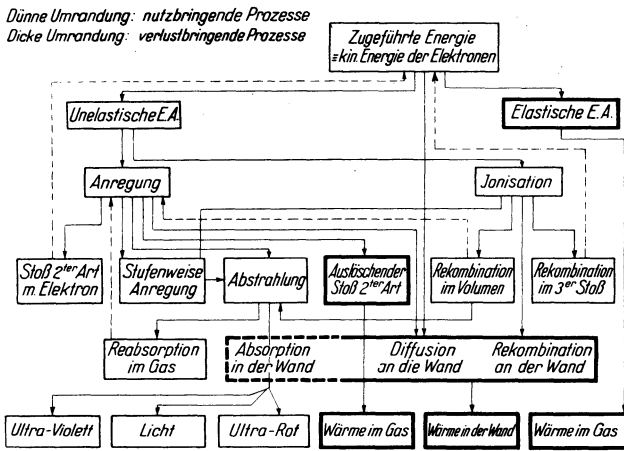


Abb. 60. Schema der Energieumwandlung in einem Plasma

Dies sind einmal Ausstrahlung, zum anderen auslöschende Vorgänge, bei denen Anregungs- bzw. Ionisationsenergie „entwertet“ wird, d. h. in Wärmebewegung der Gas- oder Wandatome umgesetzt wird und schließlich die elastischen Verluste der Elektronen, bei denen ebenfalls eine Erwärmung des Gases stattfindet. Im einzelnen ist der Energieumsatz in einer positiven Säule wegen der großen Zahl der möglichen Wechselwirkungsvorgänge sehr verwickelt. Die verschiedenen Möglichkeiten lassen sich am besten in Form eines Energieschemas zusammenstellen und überblicken [Abb. 60¹⁾].

Die Energiezufuhr erfolgt dadurch, daß die Elektronen im elektrischen Feld beschleunigt werden; ist die Geschwindigkeit aus-

1) Abb. 28 stellt dasselbe Schema nur in etwas vereinfachter Form dar.

reichend, so wird die Bewegungsenergie der Elektronen durch „unelastischen Energieaustausch“ auf die Atome zur Anregung bzw. Ionisation übertragen. Ein bestimmter, wenn auch nicht großer Bestandteil der kinetischen Elektronenenergie wird bei der Beschleunigung durch den bei den Stößen auftretenden „elastischen Energieaustausch“ direkt in Wärme umgesetzt. In dem Energieschema kann man die weiteren Umsetzungsvorgänge der Anregungs- bzw. Ionisationsenergie verfolgen, bis sie in Form von Strahlung die positive Säule verlassen bzw. als Wärme endgültig der Entladung verloren gehen.

Bei den neben der Ausstrahlung auftretenden Energieumsetzungen überwiegt, wie Versuche gezeigt haben, der Energieverlust durch Rekombination von Ionen und Elektronen an der Wand, so daß also die zugeführte Energie sich praktisch vollständig auf diese beiden Vorgänge verteilt. Wenn man nun verfolgt, wie sich das Verhältnis dieser beiden bei den verschiedenen Betriebsbedingungen zur Veränderung des Spektrums gestaltet, so findet man, daß mit wachsender Stromstärke die Rekombinationsverluste gegenüber den Ausstrahlungsverlusten immer mehr zunehmen. Hat man z. B. eine Natrium-Edelgasentladung, so betragen sie etwa 20 % der gesamten zugeführten Energie bei etwa 10 mA cm^{-2} , während bei einer Stromdichte von 1 A cm^{-2} etwa 80 % auf sie entfallen. Man sieht hieraus, daß sich (unter Voraussetzung des hier betrachteten Mechanismus der Entladung) extrem hohe Ausbeuten, die einer praktisch verlustfreien Umsetzung der elektrischen Energie in Strahlung nahekommen, nur mit Resonanzlinien von Atomen erzielen lassen. Wählt man die Betriebsbedingungen so, daß auch höhere Linien ausgesandt werden, so hat man von vornherein wegen der Zunahme der Rekombinationsverluste eine schlechtere Ausbeute in Kauf zu nehmen. Gleichzeitig sieht man, daß die Ausbeute der Resonanzlinie außerordentlich schnell mit der Stromdichte abnehmen muß. Denn einmal gelangt von der gesamten zugeführten Energie überhaupt nur ein wesentlich kleinerer Anteil zur Abstrahlung, und sodann verkleinert sich überdies noch der Anteil der Intensität der Resonanzlinie an der gesamten Abstrahlung.

Will man endlich auf Grund der Kenntnis dieser „physikalischen“ Energiebilanz auf die „technische“ Energiebilanz schließen, so ist noch ein sehr wesentlicher Faktor zu berücksichtigen. Bei allen Metaldampflampen muß ja zur Unterhaltung des für den Betrieb günstigsten Dampfdruckes das Gasentladungsrohr auf einer Temperatur von einigen hundert Grad gehalten werden, z. B. für Natrium auf etwa 280° C , für Quecksilber (Hochdruckröhren) auf etwa 350° , für Thallium auf etwa 600° C usw. Dazu ist natürlich auch eine gewisse Energie erforderlich, die durch die Wärmeverluste des

Gasentladungsrohres gegeben ist, und die technisch von der Gasentladung selbst geliefert werden muß. Durch äußerste Wärmeisolation gelingt es, diesen Faktor einzuschränken, etwa indem man das eigentliche Gasentladungsrohr mit einem oder mehreren Vakuummänteln umgibt, jedenfalls aber hat man von vornherein die Betriebsbedingungen so einzustellen, daß die im Gasentladungsrohr auftretenden Verluste die erforderliche Erwärmung des Rohres herbeiführen. Auf diese Weise ist es verständlich, daß eine technische Natriumlampe eine Lichtausbeute von nur etwa 60 Lm/W entsprechend einem visuellen Nutzeffekt von etwa 15 % besitzt, während sich im Laboratorium bei Fremdheizung des Rohres ohne weiteres 70 %, also etwa 370 Lm/W und mehr erzielen ließen. Die Differenz ist auf die Unvollkommenheit der Wärmeisolation zurückzuführen. Anders liegen die Verhältnisse bei Edelgasröhren, wo eine Erwärmung nicht nötig ist, und bei denen die physikalische Energiebilanz ohne weiteres der technischen gleichzusetzen ist.

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

A. Abbildungen

	Seite
1. Wirkungs- und Verwendungsbereich elektromagnetischer Wellen (Gesamtbereich der Energiestrahlung)	1
2. Empfindlichkeit des menschlichen Auges für die verschiedenen Wellenlängen der sichtbaren Strahlung	2
3. Linienspektrum.	3
4. Abhängigkeit des Reflexions- und Absorptionsvermögens verschiedener Stoffe von der Wellenlänge	5
5. Energieverteilung der Strahlung des schwarzen Körpers	6
6. Theoretisch mögliche und praktisch erreichbare Werte der Lichtausbeute für ungeordnete Strahlung (Temperaturstrahlung)	7
7. Spektrale Energie- und Helligkeitsverteilung des schwarzen Körpers bei 3500° K	7
8. Visueller Nutzeffekt der Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers	8
9. Berechnung der Helligkeitssumme für reine Neonstrahlung auf Grund von Messungen der relativen Intensitäten	9
10. Lichterscheinungen und Spannungsverlauf in einer Gasentladungsröhre	14
11. Charakteristik einer Gasentladung unter verschiedenen Betriebsbedingungen	16
12. Beschreibung einer Quecksilberröhre in „Gedanken von den Eigenschaften der Elektrizität“ von Johann Heinrich Winkler, Leipzig 1744	19
13. Moore-Lichtanlage mit Atemventil älterer Ausführung	20
14. Neues Ventil nach Becker-Pirani	20
15. Verschiedene Ausführungsformen von Glimmlampen	22
16. Schematische Darstellung der amerikanischen Blechtopf- und der deutschen Blockelektrode	26
17. Alte Gleichstromhochleistungsröhre in Gleichrichterschaltung für Anschluß an Wechselstrom	27
18. Oxydelektroden mit Heizwendel für Stromstärken bis 10 Amp.	28
19. Verschiedene Formen von Oxydelektroden mit und ohne Fremdeheizung	29
20. Schaltskizze für Betrieb und Zündung einer Hochleistungsleuchtröhre mit Hilfe von Hochfrequenzentladung und Außenelektroden	31
21. Schaltskizze für Betrieb und Zündung einer Hochleistungsleuchtröhre durch Hilfsentladung zwischen einer Innenelektrode und einer der Hauptelektroden	31
22. Graphische Bestimmung der Brennspannung einer Gasentladungsröhre aus der Charakteristik und der Widerstandsgeraden	33

23. Schaltungen einer Gasentladungsröhre mit Vorschaltdrossel und Kondensator zum Betrieb von Röhren mit hohen Zündspannungen. . .	34
24. Strom- und Spannungsverlauf an einer Entladungsröhre (Quecksilber-Hochdruckröhre) bei Verwendung einer Vorschaltdrossel und Kondensator	34
25. Ausführungsformen von Schlauch- und Schlitzlampen	37
26. Lichtspritze	38
27. Spannungsabfall in einer Hochspannungs-Leuchtröhre (Entladung bei kalten Elektroden)	39
28. Schema einer Energiebilanz der positiven Säule	42
29. Theoretisch mögliche und praktisch erreichbare Werte der Lichtausbeute für Natriumdampf	45
30. Ökonomie der positiven Säule einer Gasentladung zur Erzeugung monochromatischen Lichtes (Natrium- <i>D</i> -Linien) in Abhängigkeit von Stromstärke und Druck.	46
31. Täglicher Gang der Beleuchtungsstärke (Horizontalbeleuchtung) im Freien (Monatsmittel).	49
32. Neon-Hochleistungsröhre als Flughafen-Ansteuerungsfeuer.	52
33. Verbundstrahler für Arbeitsplatzbeleuchtung	54
34. Verbundstrahler als Pendelleuchte (Glühlampe und Quecksilber-röhre)	54
35. Verbundstrahler als Stehleuchte (Glühlampe und Quecksilber-röhre)	55
36. Verbundstrahler als Wandleuchten (Quecksilber- oder Neonröhre mit Osram-Linestra-Lampen)	56
37. Verbundstrahler (Neon- oder Quecksilber-röhre mit Osram-Linestra-Lampen).	56
38. Osram-Ultraröhre (Quecksilberdampf-lampe in ultraviolett-durchlässigem Glase)	57
39. Die Spektren einiger UV-Strahler	58
40. Innenaufbau der Osram-Solarca-Lampe	58
41. Lichtbogen der Osram-Solarca-Lampe von unten gesehen.	58
42. Osram-Solarca-Strahler mit Solarca-Lampe	59
43. Spektrum der Osram-Solarca-Lampe im Vergleich mit anderen UV-Strahlern	59
44. Verbundstrahler. Straßen- und Fabrikleuchten mit Quecksilberhochdruckröhren und Glühlampen	60
45. Natriumleuchtröhren in Straßenleuchten	61
46. Amerikanische Kombinationsleuchte, wie sie in der „Fabrik ohne Fenster“ verwendet wird	62
47. Natrium-Kleinlampe für Gleich- und Wechselstrombetrieb	63
48. Hochleistungsröhre für Mikroskopbeleuchtung	64
49. Eisen-Edelgaslampe	65
50. Natrium-Fernsehlampe	65
51. Natrium-Fernsehlampe im Heizkasten montiert	66
52. Einige typische Linien- und Banden-(CO ₂) Spektren	69
53. Termschema des Natriums	70
54. Die Anregungs- und Ionisierungsspannungen der wichtigsten Gase und Dämpfe	71

	Seite
55. Wirkungsquerschnitte der Elemente der ersten Gruppen des periodischen Systems	74
56. Anregungsfunktion einiger Heliumlinien (Anregungsspannung zwischen 20 und 24 Volt)	75
57. Ionisationsfunktion für Natrium und Kalium	75
58. Ausbildung der positiven Raumladung in dem Zeitintervall von 1 . . . 4 nach Anlegung der Spannung V_0 an die Elektroden . . .	79
59. Änderung der spektralen Energieverteilung mit wachsenden Strom- und Dampfdichten (a für Quecksilber, b für Cäsium)	86
60. Schema der Energieumwandlung in einem Plasma	87

B. Tabellen

I. Bezeichnungen und Einheiten	VI
II. Die verschiedenen Möglichkeiten der Lichterzeugung durch elektrische Gasentladung	VII
III. Zur Geschichte der Gasentladung	24
1. Die Entladungsformen.	
2. Die historische Entwicklung der technischen Leuchtröhren.	
3. Grundlegende Arbeiten zur Theorie der Entladung.	
IV. Leuchtdichte von Glühlampen und Gasentladungslampen	38
V. Lichtausbeute von Hochleistungsleuchtröhren	53

Sachverzeichnis

- Abreißspannung** 33.
Absorptionsvermögen 5.
Alkalifestes Glas 25.
Allgemeinbeleuchtung 48, 53.
Anodenfall 14ff., 22, 28.
Anodisches Leuchten 15.
Anregung durch Absorption von Licht 68ff.
— durch Stoß 11, 41, 68ff., 83ff.
—, geordnete 4, 5, 40, 77.
—, stufenweise 44, 75.
—, ungeordnete 4, 5.
Anregungs-Ausbeute 75, 77.
—-Funktion 74.
—-Geschwindigkeit 11, 15.
—-Spannung 11, 43, 68, 76ff.
Arbeitsbeleuchtung 54, 60ff.
Atemventil 19, 50.
Atom 10, 44, 67.
—-Bau 10, 68.
—-Elektron 11, 76.
—-Gase 78.
—-Kern 11, 68.
—-Modell 11.
—-Niveau 44.
—, Wirkungsquerschnitt des 74.
Aufbauzeit der Entladung 80.
Aufnahmelichtquelle 66.
Augenempfindlichkeit 2, 8, 45.
Auslöschung durch Stoß zweiter Art 41, 76.
Außenelektrode 31.
Auswahlregeln 70.
Autostraßenbeleuchtung 60.
- Bandenspektrum** 72.
Bariumacid 23.
Beleuchtungs-Stärke 48, 49.
—-Technik 25, 26, 47ff.
Betriebsbedingungen 44.
- Betriebsspannung** 17, 26.
Blechtöpfelektrode 26.
Blindlast 35.
Blockelektrode 26.
Bogenlampe 15.
Brenndauer 21.
Brennfleck 80.
Brennspannung 13, 17, 32ff.
Bühnenbeleuchtung 62.
- Cadmiumrohr** 54, 63, 65, 85.
Cäsiumrohr 85.
Charakteristik 15ff., 32.
Chromatischer Fehler 60.
cos φ 35.
- Dampfdichte** 44, 88.
Diffusion der Elektronen 82.
Dissoziation des Moleküls 72, 76.
Dreierstoß 76.
Drossel, Vorschalt- 16, 33ff.
Dunkelpause 33ff.
- Edelgas** 13, 18, 43.
—-Leuchtröhre 21, 44, 85.
Einfarbiges Licht 49.
Eisen-Edelgas-Rohr 65.
Elastischer Stoß 73, 76.
Elektrode 10, 46.
—, Außen- 31.
—, fremdgeheizte 26.
—, Glüh- 23, 26.
—, nicht fremdgeheizte 28.
—, Oxyd- s. Glühelektroden.
—, Wehnelt- 23.
Elektrodenabstand 22, 30.
Elektron 10ff., 30, 41, 67ff.
—, Leucht- 69.
—, Valenz- 69.
Elektronegative Gase 30.

Elektronen-Auslösung 13ff., 77.
 —. Emission, Photo- 73, 81.
 —. —, thermische 73, 80.
 —. Geschwindigkeit 11ff., 15, 17, 41, 43, 68, 73, 83ff.
 —. Lawine 12.
 —. Niveaus 69.
 —. Sprung 69.
 —. Stoß 10ff., 41, 84.
 —. Strom 82.
 —. Temperatur 82, 83.
 —. Trift 83.
 —, Leitungs- 72, 73.
 —, Sekundär- 77, 80.
 Elementarladung 68.
 Elemente der Gasentladung 10ff., 67ff.
 Emission, kalte 81.
 Energie-Abgabe, elastische 41, 43, 87ff.
 —. —, unelastische 41, 43, 87ff.
 —. Bilanz 42, 88.
 —. Resonanz 76.
 —. Schema 42.
 —. Verteilung, spektrale 86.
 —. Zerstreuung 78.
 Entladung, periodische 17.
 Entladungs-Bedingungen 43.
 —. Erscheinungen 17.
 Entmischung in der Säule 18.
 Erdalkali-Metalle 23, 27.
 —. Rohr 85.
 Erkennbarkeit 60.
 Fabrikbeleuchtung 60ff.
 Farbfilter 53, 62ff.
 Farbmischung 50, 53.
 Feldstärke der Gasentladung 10, 80, 82, 84.
 Fernseh-Glimmlampe 23.
 —. Lampe 65, 66.
 Filterfarben 53.
 Flackern 33.
 Fluorescein 56.
 Fluoreszenz 55, 56.
 Fülldruck 22, 30, 34.
 Füllgas 13, 21ff., 30, 34, 43.
 Gasatome 10.
 Gasentladung, Elemente der 10ff.

Gasentladung, Feldstärke der 10, 80, 82, 84.
 Gase, elektronegative 30.
 Geissler-Röhren 18.
 Gelb-grün-Strahler 45.
 Geordnete Anregung 4, 5, 40, 77.
 Geschichtstabellen 24, 25.
 Glas, natriumfestes, alkalifestes 25.
 Glimmlampe 15, 22ff.
 Glimmlicht, negatives 15, 22, 80.
 —, positives 81.
 Glühelektroden 23, 26ff.
 Glühlampe 6, 7, 36ff., 44, 48, 50, 53, 59.
 Gradient s. Feldstärke.
 Graustrahler 5.
 Grenzkontinuum 71, 85.
 Grundgas 43ff., 79ff.
 Grundniveau 44, 70.
 Grundzustand 44, 70.
 Hauptserie 84.
 Heliumröhre 21.
 Helligkeit 8, 9.
 Hilfsentladung 31.
 Himmelsblau 63.
 Hochdruckröhren 32, 34, 35, 44, 88.
 Hochleistungsleuchtröhren 39, 51ff.
 Hochspannungsröhren 21, 36, 39, 51.
 Höhenstrahlung 10.
 Hygienische Beleuchtung 57.
 Induktivität 35.
 Ion 12ff., 69.
 Ionengeschwindigkeit 12, 69, 79.
 Ionenstoß 84.
 Ionenwolke 14.
 Ionisation 12, 31, 44, 69, 75ff.
 Ionisations-Ausbeute 75, 84.
 —. Energieabgabe 12, 42.
 Ionisationsfunktion 75.
 Ionisierungs-Bedingungen 13, 30.
 —. Spannung 12, 43, 71, 75.
 Kathoden 23.
 Kathodenfall 14ff., 22ff., 40, 80, 84.
 Kathodenlicht 15, 81.
 Kernbewegung 72, 78.
 Kernladung 11ff.
 Kirchhoffsches Gesetz 5, 79.

Kohlensäurefüllung 50.
 Kondensatoren 33ff.
 Kontinuierliches Spektrum 3.
 Kontrahierte Säule 17, 44.
 Krater, positiver 15.

 Lebensdauer 21.
 Leistungsfaktor 35.
 Leitungselektron 72, 73.
 Leuchtdichte 21, 26, 36ff., 66.
 Leuchtelektron 69.
 Licht-Äquivalent, mechanisches 7,
 9, 45.
 --- Ausbeute 6ff., 21, 25, 39ff., 53,
 77ff., 87ff.
 --- Durchlässigkeit 53.
 --- Farbe 6, 26, 47ff., 53, 60.
 --- Geschwindigkeit 67.
 --- Quanten 67.
 --- Quelle 1.
 --- Spritze 38, 39.
 Linien, höhere 70, 84ff.
 --- Spektrum 3, 68.
 ---, verbotene 70ff.
 Lumineszenzstrahlung 4, 77.

 Magnesiumrohr 85.
 Mechanisches Lichtäquivalent 9.
 Metaldampf Lampe 43ff., 88.
 Metastabiler Zustand 68ff., 85.
 Mikroskopbeleuchtung 64.
 Moleküle 18, 67, 72.
 Molekül-Dissoziation 72, 76.
 --- Gase 18, 50, 78.
 --- Spektrum 45, 72.
 Monochromatische Strahler 44, 49.
 Moore Licht 19.

 Natrium-Bunsenbrenner 3, 64.
 --- Dampf Lampe 44ff., 60ff., 85, 88.
 --- Fernseh Lampe 65, 66.
 --- festes Glas 25.
 --- Klein Lampe 63, 65.
 Nebellicht 47.
 Nebenserien 84.
 Negatives Glimmlicht 15, 22, 25.
 Neonröhren 21, 39, 51ff.
 Niederdruckröhren 44.

Normalien, pyrometrische und ko-
 lorimetrische 66.
 Nutzbrenndauer 21.
 Nutzeffekt, optischer und visueller
 8, 9.

Ökonomie s. Lichtausbeute.
 Optischer Nutzeffekt 8.
 Oxydelektrode s. Glühelktroden.

Phasenverschiebung 35.
 Photo-Emission 73.
 --- Ionisation 71.
 --- Lampe 66.
 Photometrisches Strahlungsäquiva-
 lent 9.
 Plasma 18, 81ff.
 Positive Säule 15, 21, 25, 40, 46,
 80ff.
 Proton 68.

Quantengesetz 67.
 Quantenzahlen 69.
 Quecksilber-Dampf Lampe 3, 44, 50,
 51ff., 85.
 --- Hochdruckrohr 60.

Radioaktive Strahlung 10.
 Raumladung, positive 12, 79.
 Reabsorption 85.
 Reflexion, elastische 15.
 Reflexions-Verluste 11.
 --- Vermögen 5.
 Reklamebeleuchtung 51, 52.
 Rekombination 18, 37, 42, 45, 71,
 88.
 ---, strahlungslose 76.
 Resonanz-Linien 44, 70, 84ff.
 --- Schaltung 35.
 Restionisation 30.
 Rhodamin 56.
 Rubidiumrohr 85.

Säule, kontrahierte 17, 37.
 ---, positive 15, 21, 25, 40, 46, 80ff.
 Schichten, wandernde 18, 82.
 Schlauch-Entladung 17, 44.
 --- Lampe 37.
 Schlitz Lampe 37.
 Schwarzer Körper 5ff.

Sehvorgang 47ff.
 Sekundärelektronen 77, 80.
 Serien-Gesetze 69.
 —-Grenze 71.
 —, Haupt- 84.
 —, Neben- 84.
 Signalbeleuchtung 52, 53.
 Sinterkörper 28.
 Solarcalampe 58ff.
 Sonnenlicht 3, 48, 50, 57.
 Sonnenscheinräume 57ff.
 Sonnentemperatur 6, 7.
 Spannungs-Abfall 21, 39.
 —-Verteilung 13, 80.
 Spektrale Energieverteilung 86.
 Spektralfarben 3.
 Spektrum, Auffüllung 51, 55.
 —, Banden- 69, 72.
 —, kontinuierliches 3.
 —, Linien- 3.
 —, Molekül- 45, 50.
 Spin 68.
 Stefan Boltzmannsches Gesetz 4.
 Stokesche Regel 72, 78.
 Stoß, elastischer 11, 73, 76, 82ff.
 —-Ionisation 12, 79.
 —, unelastischer 11ff., 74, 82ff.
 —-Zahl 44.
 — zweiter Art 41, 76, 85.
 Strahlung, elektromagnetische 1, 67.
 —, geordnete 4, 10, 77.
 —, radioaktive 10.
 —, sichtbare 2.
 —, ungeordnete 4, 10, 77.
 Strahlungs-Äquivalent 9.
 —-Anregung 4, 10, 40.
 —-Gesetze, optische 4ff.
 Straßenbeleuchtung 60.
 Streutransformator 35.
 Stromdichte 36, 37, 44, 46, 84ff.
 Stromstärke 22.
 Stufenweise Anregung 75, 84.

 Tageslicht-Beleuchtung 48ff.
 —-Röhren 19, 45.
 —-Strahlung 44, 45, 50.
 Temperaturanregung 17.
 Temperaturstrahlung 3, 5, 77.
 Term 69.

Termschema 44, 70.
 Thalliumröhren 85.
 Therapieröhren 57ff.
 Thermisches Gleichgewicht 77.

 Ultrarottelephonie 66.
 Ultraviolettstrahler 50, 57.
 Unelastischer Stoß 74.
 Ungeordnete Anregung 4, 77.
 Ungeordnete Strahlung 4, 10, 77.

Valenzelektron 69, 72.
 Verbotene Linien 71.
 Verbundstrahler 50, 54, 56, 60ff.
 Verlustleistung 33, 35, 46.
 Verweilzeit 68.
 Visueller Nutzeffekt 8.
 Vitaluxlampe 58.
 Voltgeschwindigkeit 68.
 Vorionisation 31.
 Vorschalt-Drossel 16, 33.
 —-Widerstand 15ff., 32.

Wand-Ladung 30.
 —-Moleküle 41.
 —-Verlust 41.
 Wärme-Isolation 47, 88.
 —-Schutz 28.
 —-Strahlung 2.
 —-Verlust 47, 88.
 Wasserstoff 18.
 —-Atom 68.
 —-Rohr 21.
 Wehnelt-Elektroden 23.
 Wellenlänge 1.
 Wellenlängenbereiche 1.
 Widerstand, Vorschalt- 15ff.
 Wien-Plancksches Gesetz 4.
 Wirkungsgrad s. Lichtausbeute.
 Wirkungsquantum 67.
 Wirkungsquerschnitt des Atoms
 74ff., 82.

Zinkrohr 63, 85.
 Zündspannung 13, 22, 30, 32ff.,
 35, 75.
 Zündstrich 32.
 Zündung 13, 17, 21, 79.
 Zündvorrichtung 31.

Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 47. Prof. Dr. G. Berndt: *Radioaktive Leuchtfarben*. Mit 28 Abbildungen im Text und auf einer Lichtdrucktafel. M. 3,60.
- Heft 48. Dr. R. Fürth: *Schwankungserscheinungen in der Physik*. Mit 5 Abb. M. 3,15.
- Heft 50. Prof. Dr. C. Dorno: *Klimatologie im Dienste der Medizin*. Mit 11 Abbildungen. M. 2,70.
- Heft 51. Prof. Dr. C. Isenkrahe: *Zur Elementaranalyse der Relativitätstheorie*. M. 4,—.
- Heft 52. Dr.-Ing. Max Moeller: *Das Ozon. Eine physikalisch-chemische Einzeldarstellung*. Mit 32 Textfiguren. M. 5,40.
- Heft 53. Dr. V. Geilen: *Mathematik und Baukunst als Grundlagen abendländischer Kultur. — Wiedergeburt der Mathematik aus dem Geiste Kants*. M. 2,70.
- Heft 54. Dr. H. Heinrich Franck: *Die Verwertung von synthetischen Fettsäureestern als Kunstspeisefette in wirtschaftlicher, physiologischer und technischer Beziehung*. Mit 3 Abbildungen. M. 2,90.
- Heft 55. Dr. Alfred Wegener: *Die Entstehung der Mondkrater*. Mit 9 Abbild. im Text und auf 3 Tafeln. M. 2,—.
- Heft 56. Niels Bohr: *Drei Aufsätze über Spektren und Atombau*. 2. Auflage. Mit 13 Abbildungen. M. 4,50.
- Heft 57. Prof. Dr. Hans Cloos: *Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge*. Mit 24 Zeichnungen und einer Karte. M. 3,60.
- Heft 58. Dr. Walther Gerlach: *Die experimentellen Grundlagen der Quantentheorie*. 2. Auflage. Mit 43 Abbildungen.
- Heft 59. Prof. Dr. E. Study: *Denken und Darstellung in Mathematik und Naturwissenschaften*. 2. verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 3,35.
- Heft 60. Prof. Dr. techn. Milan Vidmar: *Theorie der Kreispumpe*. Mit 39 Abbildungen. M. 4,25.
- Heft 61. Reg.-Rat Dr. W. Meissner: *Entfernungs- und Höhenmessung in der Luftfahrt*. Mit 66 Abbildungen. M. 3,60.
- Heft 62. Dr. K. Siebel: *Die Elektrizität in Metallen*. M. 3,15.
- Heft 63. Dr.-Ing. M. Dolch: *Die rationelle Verwertung der niederwertigen Braunkohlen*. Mit 7 Abbildungen. M. 2,70.
- Heft 65. E. Study: *Mathematik und Physik*. Eine erkenntnistheoretische Untersuchung. M. 1,35.
- Heft 66. Dr. Walter Schallreuter: *Über Schwingungserscheinungen in Entladungsröhren*. Mit 14 Abbildungen. M. 1,35.
- Heft 67. Prof. Dr. Eberhard Buchwald: *Das Korrespondenzprinzip*. M. 4,90.
- Heft 68. Direktor Dr. Iwan Döry: *Die Schüttelerscheinungen elektrischer Lokomotiven mit Kurbelantrieb*. Mit 12 Abbildungen. M. 1,35.
- Heft 69. Prof. Dr.-Ing. Fritz Emde: *Sinusrelief und Tangensrelief in der Elektrotechnik*. Mit 18 Bildern. M. 4,—.
- Heft 70. Laurenz Bock: *Die Konstitution der Ultramarine*. Mit 3 Abb. M. 2,15.
- Heft 71. Dr. Ernst v. Angerer: *Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen*. 2. Auflage. Mit 23 Abbildungen. M. 5,40.
- Heft 72. Dr. Fritz Giese: *Das außerpersönliche Unbewußte. Theoretische Bemerkungen zum intuitiven Denken*. M. 3,15.
- Heft 73. Dr.-Ing. Karl Becker: *Die Röntgenstrahlen als Hilfsmittel für die chemische Forschung*. M. 4,90.
- Heft 74. Dr. W. H. Creutzfeldt: *Korrosionsforschung vom Standpunkte der Metallkunde*. M. 1,80.
- Heft 75. Dr.-Ing. Karl Becker und Fritz Ebert: *Metallröntgenröhren (Wirkungsweise, Anlage, Betrieb)*. Mit 34 Abbildungen. M. 3,20.