

MEYER-SEITZ

ULTRAVIOLETTE STRAHLEN

ULTRAVIOLETTE STRAHLEN

IHRE ERZEUGUNG, MESSUNG UND ANWENDUNG
IN MEDIZIN, BIOLOGIE UND
TECHNIK

VON

A. E. HERBERT MEYER UND ERNST OTTO SEITZ
DR. PHIL. DR. PHIL.

MIT EINEM GELEITWORT VON PROFESSOR DR. B. RAJESKY
Direktor des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Biophysik Frankfurt/Main

MIT 261 ABBILDUNGEN UND 58 TABELLEN

2. ERWEITERTE AUFLAGE



BERLIN 1949

WALTER DE GRUYTER & CO.

VORMALS G. J. GÖSCHEN'SCHE VERLAGSHANDLUNG - J. GUTTENTAG, VERLAGS-
BUCHHANDLUNG - GEORG REIMER - KARL J. TRÜBNER - VEIT & COMP.

ALLE RECHTE VORBEHALTEN
WALTER DE GRUYTER & CO., VORMALS G. J. GÖSCHEN'SCHE VERLAGSHANDLUNG –
J. GUTTENTAG, VERLAGSBUCHHANDLUNG – GEORG REIMER – KARL J. TRÜBNER – VEIT & COMP.
ARCHIV Nr. 5273 49. PRINTED IN GERMANY
GESAMTHERSTELLUNG VON J. J. AUGUSTIN, GLÜCKSTADT

Geleitwort

Noch vor wenigen Jahren schien die Entwicklung auf dem Gebiete der praktischen Verwendung von ultravioletten Strahlen, abgesehen von gewissen technischen Anwendungen und apparativen Neuerungen, in ihren Grundzügen zum Stillstand gekommen zu sein. Den weitaus größten Teil nahm dabei die Verwendung der ultravioletten Strahlung für therapeutische Zwecke ein: Lupus- und Rachitis-Bekämpfung sind hier, neben anderen medizinischen Anwendungen, als besonders markante Beispiele zu nennen. Verschiedene technische Anwendungen, vor allem die Lumineszenzanalyse, ergänzten diesen praktischen Geltungsbereich des UV-Lichtes. Bezeichnenderweise befand sich auch die einschlägige, rein wissenschaftliche Forschungsarbeit in einer gewissen Stagnation. Die neuere Zeit brachte jedoch einen bemerkenswerten Aufschwung und eine bedeutende Ausweitung des gesamten UV-Gebietes. Sowohl die technisch-apparative Seite, als auch die Grundlagen-Forschung und die praktische Verwendung der UV-Strahlung in der Medizin und in der Technik erfuhren so wesentliche Bereicherung, daß in vieler Hinsicht neue Perspektiven und neue Wege eröffnet wurden. Es unterliegt heute keinem Zweifel, daß der UV-Forschung und -Technik in naher Zukunft große Erfolge beschieden sein werden. Die Wirkungen des UV-Lichtes gehören heute schon zu den reizvollsten Gebieten der biophysikalischen Forschung. Die Anwendung der UV-Strahlen als struktur-analytisches Werkzeug (Absorptions- und Wirkungsspektrums-Analyse) in der Biochemie und Biologie, neue Erkenntnisse über die Erythem- und Pigmentbildung, neue Wege in der Prophylaxis und Therapie der Rachitis, die Einführung der UV-Prophylaxis in die Arbeitshygiene, steigende technische Anwendung sind die Wegweiser der sich anbahnenden Entwicklung.

So kommt das neue Buch für die Physik, Technik und Anwendungen der UV-Strahlung zu rechter Zeit, um so mehr, als es die erste zusammenfassende Darstellung des gesamten Gebietes ist. Es ist sehr zu begrüßen, daß die Autoren sich entschlossen haben, das reiche im Laufe der vieljährigen Arbeit auf diesem Gebiet von ihnen gesammelte eigene, sowie bisher im wissenschaftlichen und technischen Schrifttum zerstreute Material in systematischer Darstellung den interessierten Kreisen zugänglich zu machen. Es bestand ein dringendes Bedürfnis nach einem solchen Werke. Daß es von zwei besonderen erfahrenen Fachvertretern geschrieben wurde, welche die volle Möglichkeit hatten, das gesammelte Material und die prinzipiellen Fragestellungen aus eigener praktischer Erfahrung heraus zu redigieren bzw. zu erläutern, erhöht den Wert des vorliegenden Buches ganz besonders. Es ist ein umfassendes und zuverlässiges Nachschlagewerk entstanden, daß als Führer und wertvoller Berater dem Neuling und als erfahrener Auskunfterteiler dem Fachmann dienen wird. Den Verfassern und dem Verlag gebührt großer Dank dafür, daß sie das Buch mit zahlreichen Figuren, Tafeln und Tabellen versehen haben, die vieles für die praktische Arbeit und für die Forschung Wissenswertes und Erforderliches enthalten. Dadurch ist dem neuen Werk das Interesse der einschlägigen Kreise, ja die Unentbehrlichkeit bei Studium und Bearbeitung der neuzeitlichen Probleme des UV-Lichtes gesichert.

Vorwort zur 1. Auflage

Wohl selten gehört auf einen wissenschaftlich-technischen Gebiet die Kenntnis der Strahlungsquellen, die Beherrschung der Meßtechnik und die Erfahrung über zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in Biologie und Technik so eng zueinander, wie gerade auf dem Gebiet der ultravioletten Strahlen. Das im Anhang zusammengestellte Schriftenverzeichnis zeigt, daß die Originalliteratur vielfältig zersplittert und nur bei genauer Kenntnis des in- und ausländischen Schrifttums dem Einzelnen erschlossen ist. Wir haben es daher bei unseren eigenen Arbeiten stets bedauert, daß keine zusammenfassende Darstellung vorhanden ist, aus der über die den praktisch arbeitenden Mediziner, Biologen und Physiker interessierenden Fragen auf dem Gebiet der ultravioletten Strahlen zuverlässige und erschöpfende Auskunft zu holen ist. Bei der Sichtung des Schrifttums ergab sich weiter die bedauerliche Erkenntnis, daß viele der heranzuziehenden Arbeiten an einem Grundübel kranken. Oft kennt der auf dem Gebiet der Strahlenerzeugung arbeitende Techniker die Forderungen der Meßtechnik und die verschiedenen Anwendungen der Strahlung nur mangelhaft, oder der Meßtechniker ist über die Eigenschaften der Strahlenquellen selbst unzureichend im Bilde. Der Mediziner, Biologe, Chemiker und Physiker, der die ultravioletten Strahlen als Handwerkszeug verwendet, oder die Einwirkung dieser Strahlung auf die tote oder lebende Materie untersucht, setzt den Wert seiner Arbeit oft dadurch herab, daß er bei der Auswahl der anzuwendenden Strahlenquellen nicht alle Möglichkeiten erschöpft oder die meßtechnischen Anforderungen nicht genügend berücksichtigt, so daß die qualitative und quantitative Auswertung seiner Ergebnisse oft Schwierigkeiten bereitet. Es erschien daher nützlich, das von uns gesammelte Material in einer zusammenfassenden, das Wesentliche hervorhebenden Darstellung den interessierten Kreisen als Grundlage für weiteres Arbeiten zu unterbreiten. Zu diesem Verfahren wurden wir von Herrn Prof. Dr. B. Rajewsky, Kaiser-Wilhelm-Institut für Biophysik, Frankfurt a. M. in zahlreichen Diskussionen ermuntert. Wir hoffen, daß das vorliegende Buch seine Aufgabe erfüllen wird. Wir haben uns bemüht, die Darstellungsform möglichst einfach und auch den Nichtfachmann der jeweiligen Arbeitsrichtung verständlich zu halten. Nach einem einleitenden Kapitel, das der Klärung der Grundbegriffe und einer Übersicht über das gesamte Gebiet gewidmet ist, haben wir im ersten Hauptteil unseres Buches, die Strahlenerzeugung behandelt, wobei wir uns auf die Darstellung derjenigen Eigenschaften der Strahlungsquellen beschränkten, die für die praktische Anwendung wichtig sind. Ausführlicher wurden die Gesetzmäßigkeiten der Gasentladung, speziell der Quecksilber Hochdruckentladung, behandelt. Auch hinsichtlich der Kohlenbogenlampen und der Temperaturstrahler ist das Wesentliche zusammengestellt worden. Besondere Sorgfalt haben wir auf die Beschreibung und Diskussion der bei der natürlichen UV-Strahlenquelle — der Sonne — gewonnenen Erkenntnisse verwendet. Durch zahlreiche Tabellen und Kurvendarstellungen hoffen wir, diesen der Strahlenerzeugung gewidmenden Teil zu einem zuverlässigen Nachschlagewerk über alle praktisch wertvollen UV-Strahlenquellen gestaltet haben.

Die Meßtechnik forderte gleichfalls eine gründliche und das gesamte meßtechnische Rüstzeug umfassende Bearbeitung. Wir haben versucht, an einer Reihe von Beispielen die einzelnen Aufgaben der Meßtechnik lebendig zu beschreiben und für alle Anwendungen eine klare Arbeitsanweisung herauszuarbeiten. Meßverfahren, die lediglich historisches Interesse haben, haben wir zwar erwähnt, uns aber im wesentlichen auf die neuere, objektive Spektralphotometrie beschränkt. Als Hilfsmittel für die Zerlegung in enge, bzw. breite Spektralbereiche wurden die Monochromatoren, bzw. die verschiedenen Filterverfahren behandelt. Unter den Strahlungsempfängern wurden Thermoelemente, Photozellen und Photoelemente bevorzugt. Die Verwendung der photographischen Platte für Strahlungsmessungen wurde nur in den Grundzügen besprochen.

Bei den Strahlungsquellen und Meßinstrumenten haben wir die in Deutschland im Handel nicht erhältlichen nur dann herangezogen, falls ihnen eine grundsätzliche Bedeutung zukommt. Die getroffene Auswahl, namentlich auch unter den Meßinstrumenten, soll keinerlei Werturteil darstellen. Es konnte unter der großen Fülle brauchbarer Geräte nur eine kleine Auswahl charakteristischer Vertreter verschiedener Typen besprochen werden.

Hinsichtlich der Anwendung der UV-Strahlung konnten wir uns im Bezug auf die Lumineszenzerscheinungen kurz fassen, da auf diesem Gebiet bereits ein umfangreiches Sonderschrifttum besteht. Dagegen sind die biologisch-medizinischen Anwendungen in ihren Grundlagen ausführlich beschrieben worden. Einen weiten Raum nimmt hierbei das klassische Gebiet der Erythem- und Pigmenterzeugung ein. Gerade dieses auch weiteren Kreisen bekannte Gebiet haben wir benutzt, um die charakteristischen Eigenschaften und die einschlägige Arbeitsmethodik der biologischen Strahlungswirkungen zu erläutern. Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der UV-Strahlung in der Medizin ist die Bekämpfung der Rachitis. Wir haben uns bemüht, die Rolle der UV-Strahlung auf diesem wichtigen Gebiet der Volkswohlfahrt in größerem Zusammenhang zu bringen. Bei der Beschreibung der übrigen medizinischen Anwendungen haben wir uns dagegen auf eine referierende Wiedergabe beschränkt, wobei wir im wesentlichen den bekannten Darstellungen von Guthmann, Jüngling und anderen folgten. Auf dem Gebiete der technischen Anwendungen haben wir zwar möglichst Vollständigkeit angestrebt, bei der großen Anzahl der Anwendungsmöglichkeiten konnten aber viele nur erwähnt werden.

Das vorliegende Buch soll den Stand der gegenwärtigen Kenntnisse objektiv wiedergeben, ohne die geschichtliche Entwicklung besonders zu berücksichtigen. Die einzelnen Autoren, auf deren Arbeiten wir uns stützen, wurden im allgemeinen im Text nicht genannt; sie sind aber durch in Klammern gesetzte Ziffern, die im Schrifttumsverzeichnis wiederkehren, leicht aufzufinden. Diese umfaßt alle wichtigen Arbeiten, vor allem der letzten Jahre. Wir haben es nach einigen Hauptgesichtspunkten entsprechend der Einteilung dieses Buches gegliedert und die ausführlichen Titel der Arbeiten genannt, so daß es auch selbständig benutzt werden kann. Das ausführlich gehaltene Inhaltsverzeichnis wird zusammen mit dem Stichwortregister die Benutzung des Buches erleichtern.

Wir möchten an dieser Stelle alle diejenigen Herren erwähnen, die uns bei der Abfassung dieses Buches unterstützt haben. Besonders danken wir Herrn Prof. Dr. B. Rajewsky, der uns sowohl bei der Lesung des Manuskriptes als auch der Korrektur viele wertvolle Ratschläge gegeben hat. Herr Prof. Dr. F. Holtz, Berlin, gewährte uns freundlicherweise Einblick in sein Manuskript zu dem im Auftrag der Reichsärzteführung aufgenommenen Rachitisschulungsfilm, wofür wir auch hier danken möchten. Schließlich verpflichten uns zu besonderem Dank die Herren C. Braband, Berlin durch wertvolle Mitarbeit bei Abfassung des physikalischen

Teiles und Dr. F. Lauster, Hanau, Geschäftsführer der Quarzlampen Gesellschaft m.b.H., Hanau a. Main, durch wertvolle Ratschläge und verständnisvolle Förderung dieser Arbeit. Wir danken auch unserem Mitarbeiter, Herrn Dipl. Ing. W. Lotz, der uns bei der Anfertigung der Abbildungsunterlagen zur Seite stand, sowie den zahlreichen Firmen, die uns durch Überlassung von Druckstöcken und von teilweise unveröffentlichtem Material unterstützt haben.

Hanau, im November 1941.

A. E. H. Meyer.

E. O. Seitz.

Vorwort zur 2. Auflage

Unser Buch ist von der Fachwelt günstig aufgenommen worden. Wir danken den zahlreichen Referenten für die in ihren Besprechungen und teilweise auch in Zuschriften geäußerten Wünsche und Anregungen, denen wir bei der Bearbeitung der 2. Auflage weitgehend folgten.

Ihr Erscheinen war schon für 1944 vorgesehen, sie kam aber nicht mehr zum Druck. Nach Kriegsende bereitete es ungewöhnliche Mühe, die verlorengegangene Schrifttumssammlung wieder aufzubauen und das Manuskript und die Abbildungsunterlagen zu rekonstruieren. Wir danken dem Verlag für sein großes Verständnis, mit dem er die durch diese Schwierigkeiten bedingte Verzögerung des Ausdruckes hinnahm. Als positiver Gewinn dieser Verzögerung muß gewertet werden, daß dadurch die Möglichkeit geschaffen wurde, die bis heute im Inland herausgekommene neue Literatur mitverarbeiten zu können und vor allem die angelsächsische Literatur, die uns erst zugänglich wurde, als das Buch im wesentlichen schon abgeschlossen war. Wir mußten uns entschließen, um diese Literatur auszuwerten, das letzte Kapitel, das der „Technischen Anwendung“ gewidmet ist, völlig umzuarbeiten.

Wir danken den Herren D. A. Jones, Slough, Bucks, England und H. Laub, Ph. D., Newark N. J. USA, die uns freundlicherweise eine reiche Sammlung angelsächsischen Schrifttums übersandten.

Der Gesamtumfang unseres Buches hat, trotz Beschränkung auf das Wesentlichste um 7 Druckbogen zugenommen, die Zahl der Abbildungen ist von 217 auf 261, die der Tabellen von 40 auf 58 gestiegen, der Schrifttumsnachweis von 710 auf 1334 Nummern. Die Halbtonbilder haben wir auf eingeschlossenen Bogen, die möglichst in der Nachbarschaft der betreffenden Textstelle angeordnet wurden, untergebracht. Ursprünglich war diese Maßnahme ein Ausweichen vor der Beschaffungsschwierigkeit einwandfreien Papiers, wurde aber auch nach Wegfall dieser Schwierigkeit beibehalten, da nach unseren eigenen Erfahrungen das Arbeiten mit auf Kunstdruckpapieren gedruckten Büchern bei künstlicher Beleuchtung wegen der unvermeidlichen Reflexe eine Qual ist.

Leider ist infolge der Zonengrenzen und der Kriegsfolgen eine so weitgehende Umschichtung im Kreise der Hersteller von Strahlungsquellen und Meßgeräten erfolgt, daß die von uns gebrachten Angaben lückenhaft sein müssen und nicht in allen Fällen auf den derzeitigen Stand gebracht werden konnten. Wir haben vielmehr bewußt den früheren Hersteller auch dann genannt, wenn das Weiterbestehen seines Betriebes uns nicht bekannt war.

Den Aufbau und die Gliederung haben wir, da sie sich bewährt haben, beibehalten. Wir haben aber zahlreiche Tabellen, die den Fluß des Textes stören und oft getrennt benutzt werden, aus dem Text herausgezogen und im Anhang gebracht. Die Zahl der Tabellen haben wir außerdem durch die Hinzunahme verschiedener Zusammenstellungen der Materialeigenschaften erweitert. Wir hoffen, die Brauchbarkeit des Buches dadurch noch erhöht zu haben.

Bei den künstlichen Strahlenquellen sind die Edelgashöchstdrucklampen neu hinzugekommen, die kugelförmigen Hg-Höchstdrucklampen ausführlicher behandelt und bei den Kohlenbogenlampen neuere Ausmessungen herangezogen worden. Auch Großbestrahlungsanlagen wurden eingehender besprochen. Das Material über Sonnen- und Himmelstrahlung wurde durch Hinzunahme neuer Tabellen besser auswertbar gemacht.

Im meßtechnischen Kapitel wurden die Probleme der Kolorimetrie und Absorptions-Spektral-Photometrie etwas ausführlicher behandelt und dabei die photographische Methode stärker herangezogen. Erweitert wurde auch die Darstellung der Lumineszenzmikroskopie und der Ultraviolett-mikroskopie. Das meßtechnische Kapitel kann durchaus selbständig als Monographie über die Methoden der objektiven Spektralphotometrie benutzt werden.

Die Darstellung der biologischen und medizinischen Grundlagen und Anwendungen konnte an einigen Stellen gleichfalls durch neue Erkenntnisse bereichert werden. Beachtung verdienen die Sulphydrylkörperhypothese und die Ausführung über die Dosisabhängigkeit der medizinischen Wirkung von UV-Strahlung. Wir mußten es uns aber versagen, auf die neuere Quantenbiologie breiter einzugehen, da dies den Rahmen unseres Buches gesprengt hätte und hierüber neue Monographien erschienen sind bzw. erscheinen werden.

Die technischen Anwendungen der UV-Strahlung haben eine bedeutende Ausweitung erfahren. Eine Sonderstellung nimmt hierbei die Entkeimung gasförmiger, flüssiger und fester Medien ein, die sowohl für allgemeine hygienische Zwecke, als auch in der Nahrungsmittel- und pharmazeutischen Industrie in USA vorangetrieben wurde. Auch der Einsatz der UV-Strahlung für photochemische Verfahren in großtechnischem Maßstab hat Fortschritte gemacht, über die berichtet wird.

Herr cand. phys. W. Kirchhoff hat uns beim Lesen der Korrekturen dankenswerterweise unterstützt.

Besonderen Dank sagen wir Herrn Direktor Franz Günther, Quarzlampen GmbH, Hanau, für die freundliche Unterstützung unserer Arbeiten.

Hanau, Frühjahr 1949.

A. E. Herbert Meyer.

E. O. Seitz.

Inhalt

Kapitel I		Seite
Allgemeine Übersicht und Grundbegriffe		1
1. Einleitung. 2. Geometrische Optik. 3. Strahlungsenergie. 4. Wellennatur der Strahlung. Einteilung des UV. 5. Spektrum. 6. Graphische Darstellung von Spektren. 7. Wellenlängenabhängigkeit von Reflexion, Brechung, Streuung und Absorption. 8. Lichtquanten. 9. Physikalische Wirkungen. 10. Photochemische Wirkungen.		
Kapitel II		
Erzeugung von UV-Strahlen		12
11. Möglichkeiten der UV-Erzeugung.		
A. Gasentladungsstrahler		12
a) Grundsätzliches zur Gasentladung		12
12. Lichterscheinungen in der Gasentladung. 13. Entladungsträger. 14. Anregung und Trägerbildung. 15. Zündspannung, Klemmenspannung. 16. Austrittsarbeit und Kathodenfall. 17. Glühkathode, Oxydkathode. 18. Feldkathode und Bogenkathode. 19. Glimmentladung, Bogenentladung. 20. Positive Säule, Gradient.		
b) Elektrische Eigenschaften von Entladungsröhren		19
21. Kennlinie, Charakteristik. 22. Stabilitätsbedingungen. 23. Verluste im Vorschaltwiderstand. 24. Wechselstrom. 25. Wechselstromentladung. 26. Klemmenspannung und ihre Messung. 27. Leistungsmessung, Verzerrungsfaktor. 28. Stabilität bei verschiedenen Vorschaltgeräten. 29. Vorschaltgeräte, insbesondere Drossel. 30. Zündhilfe.		
c) Quecksilber-Entladung		27
31. Allgemeines über Niederdruck- und Hochdruckentladung. 32. Gradient. 33. Spektrum der Hg-Entladung. 34. Druckabhängigkeit der Lichtausbeute. 35. Übersicht über die Größen, von denen die Strahlungsausbeute abhängt. 36. Ausbeute der Resonanzlinien 254 m μ und 185 m μ . 37. Ausbeute der Linien 366 m μ . 38. Ausbeute für verschiedene UV-Bereiche. 39. Tabellarische Zusammenstellung der Ausbeute für die einzelnen Linien. 40. Kontinuumstrahlung. 41. Eignung der Hg-Entladung als Strahlungsnormal. 42. Einfluß des Vorschaltgerätes auf die spektrale Energieverteilung. 43. Schlußfolgerung.		
d) Sonstige Metalldampf- oder Gasentladungen		38
44. Metalldampfentladungen. 45. Wasserstoff- und Edelgasentladungen.		
e) Quecksilber-Hochdrucklampen		42
46. Einleitung. 47. Quarzlampe S 300 als typischer Vertreter einer Hg-Hochdrucklampe mit Glühelktroden. 48. Zündung. 49. Dosierung der Hg-Menge. 50. Einbrennvorgang. 51. Einfluß der Netzspannungsänderungen. 52. Spektrale Werte. 53. Betrieb in waagerechter und senkrechter Brennlage. 54. Abnahme des Strahlungsflusses während des Betriebes. 55. Vorschaltgeräte. 56. Glaslampe. 57. Höchstdrucklampe. 58. Hg-Hochdrucklampen mit flüssigen Elektroden.		
f) Handelsübliche Entladungslampen		55
59. Quarzlampen für allgemeine UV-Zwecke. 60. Hg-Hochdrucklampen mit Filterung, sowie Hg-Niederdrucklampen. 61. UV-Normallampe nach Krefft, Rößler und Rüttenauer. 62. Hg-Lampen mit eingebautem Temperaturstrahler. 63. Wasserstoff- und Edelgaslampen. 64. Spektrollampen und Eisenbogenlampe.		

	Seite
B. Temperaturstrahler	62
65. Allgemeines. Schwarzer Körper. 66. Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers. 67. UV-Strahlung des schwarzen Körpers. 68. Strahlung von nicht-schwarzen Körpern, insbesondere Wolfram. 69. Wolframglühlampen einschließlich Wolframbandlampen. 70. Farbtemperatur, schwarze Temperatur. 71. Wolframpunktlichtlampe. 72. Strahlungsquellen mit Gasentladungs- und Temperaturstrahlung.	
C. Bogenlampen mit abbrennenden Elektroden und Funkenstrecken	71
73. Allgemeines. 74. Elektroden. 75. Elektrische Verhältnisse. 76. Strahlung. 77. Eingeschlossener Lichtbogen. 78. Hochstrombogen, insbesondere Beckbogen. 79. Funkenstrecke.	
D. Die Sonne	80
80. Extraterrestrische Strahlung der Sonne. 81. Absorption und Streuung in der Erdatmosphäre. Himmelsstrahlung. 82. Gesamtbestrahlungsstärke der Sonnen- und Himmelsstrahlung. 83. Gesamtbestrahlungsstärke der Sonnen- und Himmelsstrahlung im UV-B. 84. Einfluß der Meereshöhe auf die Bestrahlungsstärke im UV-B. 85. Einfluß der Bewölkung. 86. UV-Klima der Großstadt. 87. Sonnen- und Himmelsstrahlung im UV-A. Zusammenfassung.	
Kapitel III	
Messung der UV-Strahlung	91
A. Spektrale Zerlegung	91
88. Grundlagen. 89. Monochromator-Prinzip. 90. Prismen. Dispersion. 91. Auflösung. 92. Lichtstärke. 93. Spektrale Reinheit. 94. Doppelmonochromator. 95. Handelsübliche Spektralapparate.	
B. Strahlungsempfänger mit ihren elektrischen Meßgeräten	98
96. Thermoelement. 97. Galvanometer. 98. Galvanometerverstärker. 99. Nichtselektivität. 100. Eichen des Thermoelementes. 101. Selektive Strahlungsempfänger. 102. Prinzipschaltbild der Photozelle. 103. Vakuumzelle. 104. Gasgefüllte Zelle. 105. Fehlerquellen und Meßgenauigkeit bei Photozellen. 106. Messung des Photozellenstromes mit Galvanometer. 107. Elektrometeranordnungen. 108. Verstärkerröhren und ihre Anwendung. 109. Lichtzähler. 110. Photoelement. 111. Winkelabhängigkeit der Empfindlichkeit von Strahlungsempfängern (Cosinus-Gesetz). 112. Allgemeine Vorsichtsmaßnahmen beim Arbeiten mit Strahlungsempfängern. 113. Photographische Platte.	
C. Allgemeines über Arbeiten mit Spektralapparaten	123
114. Aufstellung und Justierung der Spektralapparate. 115. Einstellung des Spaltes. 116. Aufstellung der Strahlenquelle. 117. Anordnung des Strahlungsempfängers. 118. Strahlungsschwächungsmittel.	
D. Allgemeine Eigenschaften der Filter und ihre Handhabung	132
119. Allgemeines. 120. Durchlässigkeit, Durchlassungsvermögen, Extinktion, Diabatie. 121. Filterkombination. 122. Einfluß der Schichtdicke auf das Durchlassungsvermögen. 123. Lambert-Beersches Gesetz. 124. Beispiel der Berechnung eines Filters. Hilfs-Nomogramm. 125. Angaben über die üblichen Filter. 126. Änderung des Filters durch Bestrahlung. 127. Temperatureinfluß. 128. Störung durch Eigenfluoreszenz des Filters. 129. Metallfilter. 130. Durchlässigkeit von Gasen und Dämpfen. 131. Filterdurchlässigkeit außerhalb des UV. 132. Durchlässigkeit der menschlichen Haut, des Blutes und der Schutzsalben. 133. Der Monochromator als Filter. Varioilluminator.	
E. Spektrale Zerlegung ohne Prisma	149
134. Filter-Monochromatoren. 135. Kontrolle durch Gegenfilter. 136. Christiansen-Filter. 137. Ausnützung der chromatischen Fehler von Linsen. 138. Polarisations-Interferenz-Filter. 139. Verwendung der Totalreflexion zur spektralen Trennung.	

	Seite
F. Durchführung von verschiedenen Spektralmessungen	156
a) Bestimmung der Durchlässigkeit und des Extinktionskoeffizienten von Filtern	156
140. Aufgabenstellung. 141. Strommessungsverfahren. 142. Strahlungsschwächungsverfahren. 143. Photographisches Verfahren. 144. Prüfung von Filtern für Strahlungsmessungen oder für biologische Versuche. 145. Absorptions-Spektrophotometrie. 146. Eichsubstanzen für Extinktionsmessungen. 147. Kolorimetrie.	
b) Bestimmung des Reflexionsvermögens	164
148. Allgemeines. 149. Messung der spiegelnden Reflexion. 150. Messung der diffusen Reflexion. 151. Daten über das Reflexionsvermögen verschiedener Stoffe.	
c) Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von selektiven Strahlungsempfängern	169
152. Allgemeines. Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeitsverteilung. 153. Allgemeine Angaben über die absolute Eichung. 154. Absolute Eichung auf Bestrahlungsstärke. 155. Absolute Eichung auf Strahlungsfluß und Ausbeute. 156. Ermittlung der absoluten Empfindlichkeit bei Eichung mit einem Wellenlängenbereich. 157. Absolute Eichung mit UV-Normal. 158. Bestimmung der Wellenlängenabhängigkeit biologischer und photochemischer Vorgänge. 159. Mit lichtstarken Monochromatoren erreichbare Bestrahlungsstärken. 160. Mehrfilterverfahren zur Ermittlung von spektralen Empfindlichkeiten.	
d) Messung der spektralen Energieverteilung von Linienspektren	177
161. Aufstellung. Monochromatordurchlässigkeit. 162. Bestimmung der relativen spektralen Energieverteilung. 163. Anschluß der relativen Messung an eine absolute bei einer Wellenlänge. 164. Anschluß der relativen Messung an die absolute Messung eines Wellenlängenbereiches, insbesondere mit einer absolut geeichten Photozelle.	
e) Messung der spektralen Energieverteilung von kontinuierlichen Spektren	181
165. Lineare Dispersion. 166. Relative Messung. 167. Absolute Messung. 168. Energieverteilung in einem aus Kontinuum und Linien bestehenden Spektrum.	
f) Durchführung von spektralen Messungen mit der photographischen Platte	184
169. Arbeiten mit Schwärzungsmarken. 170. Anwendungen. 171. Bestimmung der Brechungszahl.	
G. Strahlungsmessungen ohne spektrale Zerlegung, insbesondere unter Verwendung von Filtern und photochemischen Umsetzungen. Dosimetrie ...	187
172. Aufgabenstellung.	
a) Strahlungsmessungen unter Verwendung von Filtern	188
173. Strahlungsempfänger und Filter. 174. Die Kadmiumpzelle in ihrer Verwendung für integrierende Strahlungsmessungen. 175. Die Natriumpzelle in ihrer Verwendung für integrierende Strahlungsmessungen. 176. Das Photoelement (Sperrschichtzelle) für integrierende Strahlungsmessungen. 177. Das Thermoelement für integrierende Strahlungsmessungen. 178. Kontrolle durch Gegenfilter. 179. Fehlermöglichkeiten bei Verwendung von Filtern. 180. Bestimmung des Strahlungsflusses mit der Ulbrichtschen Kugel. 181. Differenzverfahren. 182. Auswahl unter den für die Bewertung von UV-Strahlern in Frage kommenden Filtermeßmethoden. 183. Übersichtsmessung im Gesamtspektrum. 184. Fluoreszenzverfahren.	
b) Photochemische Meßverfahren	200
185. UV-Schnellmesser. 186. Jodmethode. 187. Azeton-Methode und andere. 188. IG-Dosimeter.	
c) Dosimetrie	204
189. Dosimetrie. 190. Biologische Einheiten und biologisch begründete Einheiten der UV-Strahlung.	

Kapitel IV		Seite
Physikalische, biologische und photochemische Wirkungen der UV-Strahlen und ihre Anwendung.....		208
A. Fluoreszenz und Phosphoreszenz nebst Anwendungen		208
191. Allgemeines. 192. Resonanzfluoreszenz bei Gasen und Dämpfen. 193. Stokes'sches Gesetz. Energetische Ausbeute. 194. Abhängigkeit der Fluoreszenzstrahlung vom Aggregatzustand. 195. Leuchtphosphore. 196. Anwendung der Fluoreszenz und Phosphoreszenz in der UV-Meßtechnik. 197. Analysenlampe. 198. Anwendungsbeispiele der Fluoreszenzanalyse. 199. Photographische Aufnahmen im Fluoreszenzlicht und im reflektierten UV. 200. Titration mit fluoreszierenden Indikatoren. 201. Ergänzende Bemerkungen zur Fluoreszenzanalyse. 202. Fluoreszenzspektrum. Messung der Fluoreszenzhelligkeit und -farbe. 203. Fluorometrie. 204. Fluoreszenzmikroskopie. 205. Ultraviolett-mikroskopie. 206. Anwendung der Leuchtstoffe in der Lichttechnik.		
B. Die biologischen Grundwirkungen der UV-Strahlung		223
207. Einleitung und Allgemeines über Wirkungsmechanismen. 208. Zellzerstörende Wirkungen. 209. Photochemische Wirkungen. 210. Auswertung der biologischen Strahlungsreaktionen.		
C. Erythem und Pigment		227
a) Erscheinung und Entstehung		227
211. Allgemeines. Äußere Erscheinungsformen. 212. Abhängigkeit von der Dosis. 213. Abhängigkeit von der Wellenlänge. 214. Additivität der Wirkung von Strahlung verschiedener Wellenlängen. 215. Verschiedene Abhängigkeiten der Erythemempfindlichkeit. 216. Lichtbiologische Konstitutionsforschung. 217. Absolute Erythemempfindlichkeit. 218. Einfluß der Unterteilung der Dosis. 219. Anatomie und Physiologie der menschlichen Haut. 220. Entstehung des Erythems. 221. Pigmentierung. 222. Strahlengewöhnung. 223. Schlußfolgerungen.		
b) Methodik von Erythem- und Pigmentierungs-Versuchen		240
224. Allgemeine Bedeutung solcher Versuche. 225. Optische und elektrische Einstellung der Strahlenquelle. 226. Wahl der Teststelle. 227. Zeitpunkt der Ablesung. 228. Bestrahlungstreppe. 229. Ablesung der Bestrahlungstreppe. 230. Bestimmung der Erythemschwellendosis. 231. Bestimmung der Erythemgradation. 232. Lichtbiologische Konstitutionsforschung. 233. Einteilung der UV-Strahler nach Erythemschwelle und Erythemgradation. 234. Pigmentierungsversuche.		
c) Lichtschutzmittel.....		247
235. Allgemeines. Forderung an Lichtschutzmittel. 236. Arten der Lichtschutzmittel. 237. Bestimmung der Schutzwirkung durch Messung der spektralen Durchlässigkeit. 238. Bewertung der Lichtschutzmittel. 239. Zusammenstellung der wichtigsten Lichtschutzmittel. 240. Sonstige Eigenschaften der Lichtschutzmittel.		
D. Biologische Wirkungen der UV-Strahlung und ihre Anwendung in der Medizin.....		252
241. Allgemeine Bemerkungen. 242. Spektrale Wirkungskurven. 243. Wirkung der UV-Strahlung auf Eiweißkörper. 244. Zellzerstörende insbesondere bakterientötende Wirkung. 245. Praktische Anwendung der bakterientötenden Wirkung. 246. Konjunktivitis. 247. Sichtbarkeit von UV-Strahlung. 248. Genmutation. 249. Beeinflussung des Atmungsfermentes. 250. Krebsentstehung durch UV. 251. Fördernde und antagonistische Wirkung von Strahlung anderer Spektralgebiete. 252. Lichtsensibilisatoren. 253. Allgemeine therapeutische Wirkungen. 254. Dosisabhängigkeit der verschiedenen allgemeinen UV-Wirkungen. Bergarbeiterbestrahlung. 255. Unspezifische Anwendung der UV-Bestrahlung bei Gesunden. 256. Gegenanzeige der UV-Bestrahlung. 257. Tuberkulose. 258. Hautkrankheiten. 259. Bestrahlung von Wunden. 260. Bestrahlung von Blut und anderen Körpersäften. 261. Bestrahlung bei Operationen. 262. UV-Bestrahlung in der Zahnheilkunde. 263. Mitogenetische oder Gurwitsch-Strahlung.		

	Seite
E. Rachitis und Vitamin D	271
264. Medizinische Grundlagen und Erscheinungsformen der Rachitis. 265. Heilung der Rachitis durch Vitamin D. 266. Ungünstige Nebenerscheinungen bei Vitamin-D-Anwendung. 267. Verschiedene Vitamin-D-Arten und ihre Entstehung. 268. Die internationale Vitamin-D-Einheit. 269. Bedarf an Vitamin D. 270. Bestimmung des Vitamin D. 271. Natürliches Vorkommen von Vitamin D. 272. Wellenlängenabhängigkeit der Rachitisheilung und Vitamin-D-Bildung. 273. Rachitisheilung durch Bestrahlung des menschlichen Körpers. 274. Bestrahlung von Arzneimitteln und Nahrungsmitteln (ohne Milch). 275. Grundsätzliches über Milchbestrahlung. 276. Technische Ausführung der Milchbestrahlung. 277. Rachitisbekämpfung als Aufgabe der Volkswohlfahrt.	
F. Therapeutische Lampen und ihre Bewertung	281
278. Allgemeines. 279. Reflektor. Ausleuchtung des Bestrahlungsfeldes. 280. Reflektor. Verstärkungsfaktor. 281. Übersicht über die auf dem deutschen Markt befindlichen therapeutischen Lampen. 282. Hg-Hochdrucklampen mit festen Glüh- elektroden. 283. Hg-Hochdrucklampen mit flüssigen Hg-Elektroden. 284. Hg-Nieder- drucklampen. 285. Andere Metaldampflampen. 286. Bogenlampen mit abtrennenden Elektroden. 287. Glühlampen. 288. Speziallampen 289. Vergleich verschiedener Lam- pentypen untereinander und mit der Sonne. 290. Bewertung verschiedener therapeuti- scher Lampen hinsichtlich Erythem- und Pigmenterzeugung. 291. Vergleich verschiedener therapeutischer Lampen hinsichtlich anderer biologischer Wirkungen. 292. Rechner- ische Bewertung von UV-Strahlern, wenn absolute spektrale Energieverteilung und biologische Wirkungskurve bekannt sind.	
G. Technische Anwendung von UV-Strahlern	296
293. Überblick.	
a) Luftentkeimung	296
294. Grundlagen der Luftentkeimung durch UV-Strahlen. 295. Strahlenquellen und ihre Anordnung. 296. Anwendung der Luftentkeimung in der Industrie.	
b) Entkeimung flüssiger Medien	300
297. Entkeimung klarer, farbloser Flüssigkeiten. Wasserentkeimung. 298. Ent- keimung trüber Flüssigkeiten, wie Milch, Obstsaft und dergleichen und von Teigen.	
c) Entkeimung fester Stoffe	303
299. Lebensmittelfrischhaltung. 300. Entkeimung von Gefäßen. 301. Getreideent- muffung.	
d) Verschiedene Anwendungen auf lebende Objekte	305
302. Insektenfang. 303. Anwendung der UV-Strahlen bei der Tierzucht. 304. Anwen- dung der UV-Strahlen bei der Pflanzenaufzucht.	
e) Verschiedene physikalische Anwendungen	305
305. Anwendung der Fluoreszenz. 306. Ionenerzeugung. Ozonisierung. 307. Aufhebung des Zündverzugs bei bestrahlten Funkenstrecken. 308. Optische Telephonie mit UV- Strahlung.	
f) Anwendung in der Photochemie	307
309. Bleichen. Farbechtheitsprüfung. 310. Prüfung von Geräten auf Tropensicher- heit. 311. Kesselsteinverhütung. 312. Lacklederhärtung. 313. Lichtpauserei. 314. An- wendung von UV-Strahlern in der photographischen Technik. 315. Herstellung korn- freier Filmkopien. 316. Grundsätzliches zu photochemischen Arbeiten. 317. Photo- chlorierung. 318. Anordnung zur Durchführung photochemischer Umsetzungen. 319. Anwendung ultravioletter Strahlung zur Polymerisation von Kunststoffen. 320. Vitamin-D-Bildung durch UV-Bestrahlung von Flüssigkeiten. 321. Vitamin- D-Bildung durch UV-Bestrahlung fester Stoffe, insbesondere Hefebestrahlung. 322. Schlußbemerkung.	

	Seite
Anhang	321
Tabelle A Bezeichnungen für Strahlungsgrößen	322
Tabelle B Umrechnung verschiedener Leistungs- und Energiemaße	322
Tabelle C Daten über Quarzlampen (Hochdrucklampen)	323
Tabelle D Daten über Hg-Hochdrucklampen mit Filterung	324
Tabelle E Daten über Quarzlampen (Höchstdrucklampen)	325
Tabelle F Spektrale Daten des UV-Normals	326
Tabelle G Spektrale Daten des UV-Normals in integraler Darstellung	328
Tabelle H Relative spektrale Energieverteilung von Hg-Hochdrucklampen	329
Tabelle I Umrechnung für Durchlassungsvermögen und Extinktion	330
Erläuterungen zu Tabelle I	331
Tabelle K Werte der Extinktion für verschiedene Schottfilter	332
Tabelle L Brechungszahlen von festen Körpern und von Flüssigkeiten	334
Tabelle M Strahlungsfluß verschiedener UV-Strahlertypen	337
Schrifttum	338
Sachverzeichnis	383

Kapitel I

Allgemeine Übersicht und Grundbegriffe¹⁾

1. Einleitung. Die ultravioletten (UV) Strahlen und die sichtbaren und infraroten Strahlen bilden das Gebiet der optischen Strahlen, weil sie in ihren physikalischen Eigenschaften weitgehend übereinstimmen. Die gleichfalls zu den elektromagnetischen Strahlen gehörenden Röntgenstrahlen bzw. die Rundfunkwellen liegen jenseits der optischen Strahlen und zeigen besonders hinsichtlich Erzeugung und Anwendung wesentliche Unterschiede gegenüber den optischen Strahlen, so daß sie gänzlich außerhalb des Rahmens dieses Buches liegen, während sichtbares Licht und infrarote Strahlung gelegentlich gestreift werden.

Innerhalb der optischen Strahlen nehmen die UV-Strahlen in vielfacher Hinsicht eine Sonderstellung ein. Zunächst fehlt für sie ein unmittelbares Sinnesorgan, wie es für die sichtbaren Strahlen im Auge vorhanden ist. Daher sind die UV-Strahlen erst spät entdeckt worden (J. W. Ritter 1801). Dabei kommt den UV-Strahlen eine vielseitige Wirkung wie kaum Strahlen eines anderen optischen Gebietes zu, da sie tief in das Gefüge der Atome und Moleküle einzugreifen vermögen und daher diese physikalisch und chemisch verändern. Bevor auf die speziellen Eigenschaften der UV-Strahlen eingegangen wird, sollen die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten kurz behandelt werden, die für das ganze Gebiet der optischen Strahlen gelten, und die im folgenden als kurze Wiederholung gebracht werden.

2. Geometrische Optik. Ausbreitung. Ein UV-Strahl bewegt sich im leeren Raum gradlinig stets in derselben Richtung weiter und zwar geschieht dies mit der Lichtgeschwindigkeit von rd. 300 000 km/sek.

Reflexion und Brechung. Trifft ein UV-Strahl auf einen Körper auf, so wird ein Teil des Strahles reflektiert, der andere Teil dringt in den Körper ein. Dabei erfährt sowohl der reflektierte als auch der eindringende Strahl im allgemeinen eine Richtungsänderung. Dafür gelten die bekannten Spiegelungs- und Brechungsgesetze. Die Spiegelung wird in der Praxis viel verwendet, um die UV-Strahlen in eine bestimmte Richtung zu lenken oder sie durch Reflektoren in gewünschter Weise zu bündeln. Von der Brechung wird bei der Verwendung von Prismen und Linsen Gebrauch gemacht.

3. Strahlungsenergie. Jede Strahlung ist mit einem Energietransport in Richtung des Strahles verbunden. Man kann die Energie nachweisen und messen, indem man die Temperaturerhöhung eines Strahlungsempfängers mißt, der die Strahlung restlos oder zu einem bekannten Bruchteil absorbiert.

¹⁾ Ziffern in Klammern, z. B. [128], verweisen auf das Schrifttumverzeichnis auf S. 338 bis 382. Hinweise auf andere Textstellen erfolgen durch fette Ziffer, die den einzelnen Absätzen zugeordnet und fortlaufend durch das ganze Buch geführt sind, z. B. 51.

Die gesamte Energie, die von einer Strahlungsquelle sekundlich in den Raum ausgesandt wird, nennt man Strahlungsfluß¹⁾ (Lichtstrom²⁾), den man in Watt mißt. Unter Strahlungsausbeute versteht man das Verhältnis des Strahlungsflusses zur Leistungsaufnahme der Strahlungsquelle³⁾. Da man beide Größen in Watt mißt, ist die Ausbeute eine dimensionslose Zahl kleiner als 1, bzw. in v. H. ausgedrückt, kleiner als 100.

Die auf eine Fläche von 1 cm^2 pro Sekunde auftreffende Energie heißt Bestrahlungsstärke (Beleuchtungsstärke²⁾) und wird in Watt/cm^2 gemessen. In der Meteorologie wird diese Größe auch in $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ angegeben⁴⁾. Hat man bei parallelen Strahlen auf einer senkrecht zu den Strahlen angeordneten Fläche eine Bestrahlungsstärke B , so wird sich bei Drehung um den Winkel α die Bestrahlungsstärke auf $B \cos \alpha$ verringern (Cosinusetz).

Beispiel: Beträgt die Bestrahlungsstärke auf einer senkrecht zum Strahl stehenden Fläche $B = 100$, so ist die Bestrahlungsstärke B' auf einer um $\alpha = 30^\circ$ gegen den Strahl geneigten Fläche nur $B' = B \cdot \cos \alpha = 100 \cdot 0,866 = 86,6$.

Für viele von der Strahlung bewirkte Änderungen ist das Produkt aus der Bestrahlungsstärke und der Einwirkungsdauer, Bestrahlung oder Dosis (Belichtung²⁾) genannt, wichtig. Diese Größe wird gemessen in $\text{Watt} \cdot \text{sek/cm}^2$ oder cal/cm^2 .

Beispiel: Wirkt eine Bestrahlungsstärke $B = 0,034 \text{ Watt/cm}^2$ während der Zeit $t = 220 \text{ sek}$ ein, so ist die auf eine Fläche auftreffende Bestrahlung $B \cdot t = 0,034 \cdot 220 = 7,5 \text{ Watt} \cdot \text{sek/cm}^2$. Es ist zu beachten, daß die Bestrahlung nur die auftreffende, nicht aber die von der Fläche aufgenommene Energie angibt, da im allgemeinen nur ein Teil der Strahlen absorbiert wird.

Oft ist auch die Kenntnis der Strahldichte (Leuchtdichte²⁾) einer Strahlungsquelle wesentlich, die in $\text{Watt/cm}^2 \cdot \text{Winkel}$ angegeben wird. Diese Größe gibt an, welche Energie in der Sekunde von der Flächeneinheit der Strahlungsquelle in die Raumwinkeleinheit⁵⁾ ausgestrahlt wird. Die spezifische Ausstrahlung (spez. Lichtausstrahlung) dagegen gibt die von 1 cm^2 Fläche in den Halbraum in 1 Sekunde abgestrahlte Energie an. Die Dimension ist Watt/cm^2 . Durch Multiplikation der Strahldichte mit der strahlenden Fläche (in cm^2) erhält man die Strahlstärke (Lichtstärke), die in Watt/Winkel gemessen wird.

Abstandsgesetz. Bei einer punktförmigen Strahlungsquelle nimmt die Bestrahlungsstärke umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes ab. Dieses Gesetz gilt mit genügender Genauigkeit auch bei nicht punktförmigen Strahlungsquellen, wenn der Abstand ein Vielfaches der größten Abmessung des strahlenden Teiles der Strahlungsquelle beträgt.

Beispiel: Ist in der Entfernung $r = 2 \text{ m}$ die Bestrahlungsstärke $B = 0,01 \text{ Watt/cm}^2 = 10 \text{ mWatt/cm}^2$, so ist diese in $r' = 4 \text{ m}$: $B' = B \cdot r^2/r'^2 = 10 \cdot 2^2/4^2 = 2,5 \text{ mWatt/cm}^2$.

4. Wellennatur der Strahlung. Einteilung des UV. Die UV-Strahlung ist wie jede elektromagnetische Strahlung ein Schwingungsvorgang. Ein solcher ist durch die Frequenz charakterisiert, d. h. durch die Anzahl der Schwingungen in der Sekunde.

¹⁾ Eine vollständige Aufstellung aller üblichen Begriffe und Definitionen ist im Anhang in Tabelle A enthalten. Wir benutzen im folgenden die von der Fachgruppe für Strahlenkunde der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft vorgeschlagenen Bezeichnungen.

²⁾ Die entsprechenden in der Lichttechnik üblichen Bezeichnungen sind eingeklammert beigefügt.

³⁾ In manchen Fällen ist es zweckmäßig, den Strahlungsfluß nicht auf die Leistungsaufnahme des vollständigen Strahlers, sondern auf den für die Strahlungsausendung wesentlichen Teil, also z. B. bei Hg-Lampen auf die positive Säule, zu beziehen.

⁴⁾ $1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} = 69,7 \text{ mWatt/cm}^2$. Vgl. auch Tabelle B im Anhang.

⁵⁾ Die Raumwinkeleinheit schneidet aus der Oberfläche einer Kugel von 1 cm Radius eine Fläche von 1 cm^2 heraus.

In dem hier betrachteten UV-Gebiet liegt die Frequenz etwa zwischen 0,75 und $1,5 \cdot 10^{15}$ Schwingungen pro sek. Aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sek und der Frequenz ν ergibt sich die Wellenlänge λ aus der Gleichung $\lambda = c/\nu$. Sie liegt im UV zwischen 2 und $4 \cdot 10^{-5}$ cm. Im allgemeinen gibt man die Wellenlänge jedoch entweder in μ ($0,2$ — $0,4 \mu$) oder $m\mu$ (200 — $400 m\mu$) oder in Ångström¹⁾ (2000 bis 4000 \AA) an. Im folgenden werden wir die Wellenlänge meist in $m\mu$ angeben. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die optischen Medien verschieden ist, fällt auch die Wellenlänge der Schwingung verschieden aus, je nach dem Medium, in dem sie sich ausbreitet, während die Frequenz vom Medium nicht berührt wird. Trotzdem charakterisiert man aber die Strahlung durch die Wellenlänge, und zwar durch diejenige im Vakuum²⁾.

Aus praktischen Gründen teilt man die UV-Strahlung in drei Gebiete ein, entsprechend einem Vorschlag von Coblenz [439]:

UV-A 315 bis 400 $m\mu$

UV-B 280 bis 315 $m\mu$

UV-C unterhalb 280 $m\mu$ ³⁾.

Die Abgrenzung zwischen UV-A und UV-B ist unter dem Gesichtspunkt geschehen, daß die meisten biologischen Wirkungen ihre langwellige Grenze bei etwa 315 $m\mu$ haben. Die Grenze bei 280 $m\mu$ ist willkürlich, da wichtige biologische Wirkungen, wie Erythembildung, Rachitisheilung und Bakterientötung von Strahlung sowohl des UV-B als auch des UV-C hervorgerufen werden; für die Wahl dieser Grenze ist das Minimum der Erythemkurve (vgl. Abb. 198) bei dieser Wellenlänge maßgeblich gewesen. Strahlung aus dem UV-B nennt man auch Dorno-Strahlung.

5. Spektrum. Die Vielzahl der in einem Strahl vorhandenen Schwingungen verschiedener Frequenzen bzw. Wellenlängen nennt man ein Spektrum. Folgen in einem Spektrum die Wellenlängen lückenlos aufeinander, spricht man von einem kontinuierlichen Spektrum. Anderenfalls liegt ein diskontinuierliches Spektrum vor. Hier unterscheidet man zwischen Linien- und Bandenspektrum. Die Linienspektren bestehen aus einer mehr oder weniger großen Zahl einzelner feiner Linien, die deutlich voneinander getrennt sind. Die Bandenspektren bestehen zwar auch aus einzelnen sehr dicht gehäuften Linien, die aber deutlich aus sehr vielen Einzellinien bestehende Gruppen (Banden) bilden. Glühende feste Körper senden stets ein kontinuierliches Spektrum aus; zum Leuchten angeregte Atome in einer Gas- oder Dampfatosphäre (z. B. Quecksilberbogen) zeigen dagegen ein Linienspektrum, angeregte Moleküle aber ein Bandenspektrum. Sowohl Atome als auch Moleküle können unter besonderen Bedingungen auch ein kontinuierliches Spektrum liefern. Sind in einer Strahlungsquelle mehrere verschiedenartige Vorgänge an der Lichtaussendung beteiligt, so können Mischspektren auftreten. Als Beispiel sei hierfür der Kohlenbogen genannt, bei dem einerseits die glühenden Kohlen ein kontinuierliches Spektrum, der eigentliche Lichtbogen aber ein Banden- oder Linienspektrum liefert.

6. Graphische Darstellung von Spektren. Die von einer Strahlenquelle einer Fläche von 1 cm^2 zugestrahlte Leistung, die Bestrahlungsstärke, verteilt sich auf die verschiedenen Wellenlängen des Spektrums. Die Beschreibung der Verfahren, diese Verteilung zu ermitteln, ist die Hauptaufgabe des Kapitels III.

¹⁾ $\frac{1}{1000} \text{ mm} = 1 \mu = 1000 m\mu = 10000 \text{ \AA}$.

²⁾ Beträgt die Wellenlänge im Vakuum 300 $m\mu$, so ist sie in Luft 299,9 $m\mu$, in Wasser 223 $m\mu$ und in Quarzglas 201 $m\mu$.

³⁾ Dieses Gebiet wird gelegentlich [534, 1090] in UV-C₁ (240 bis 280 $m\mu$) und UV-C₂ (200 bzw. 220 bis 240 $m\mu$) unterteilt.

Die Bestrahlungsstärke, die in Watt/cm^2 gemessen wird, wird bei einem Linienspektrum für die einzelnen Linien nacheinander ermittelt. Die Darstellung kann in der Weise erfolgen (Abb. 1a), daß man die gemessene Bestrahlungsstärke über der Wellenlänge als Strecke aufträgt. Das Spektrum stellt sich also als eine Anzahl von einzelnen Strichen dar. Die gesamte Bestrahlungsstärke, gemessen über alle Wellenlängenbereiche, ergibt sich als die Summe der den einzelnen Linien zugeordneten Strecken.

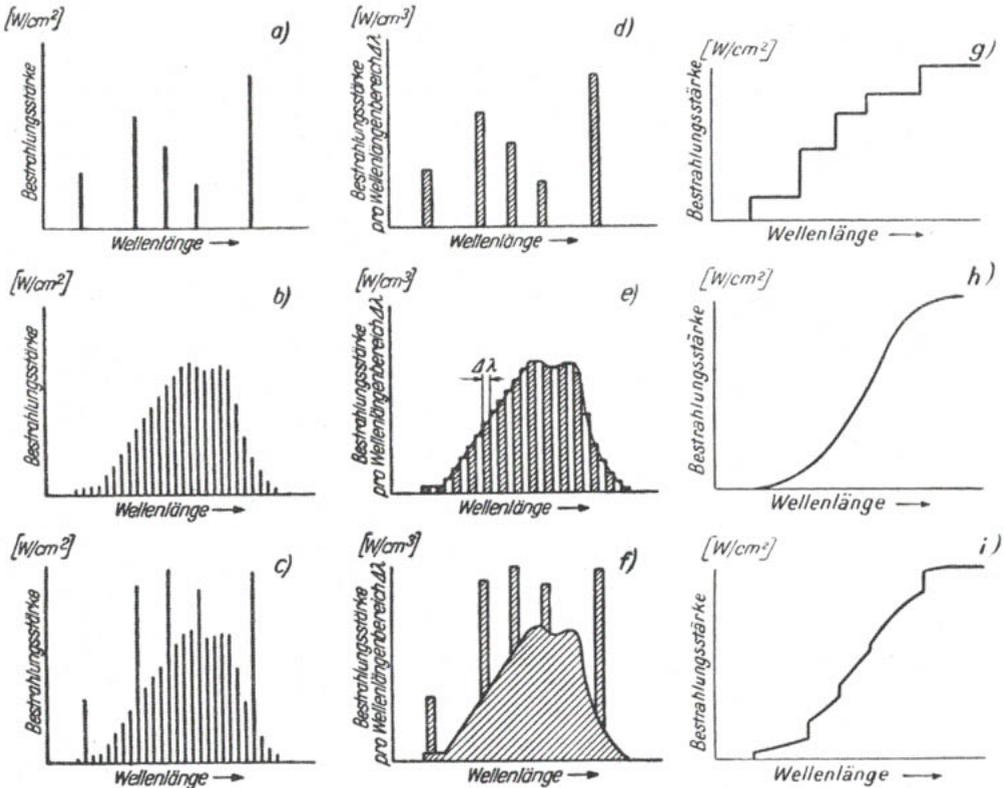


Abb. 1. Graphische Darstellung der spektralen Energieverteilung. *a*, *d* und *g* für Linienspektrum, *b*, *e* und *h* für kontinuierliches Spektrum, *c*, *f* und *i* für Mischspektren. In dem linken Abbildungsteil (*a*, *b*, *c*) als Folge von Strecken, in der Mitte (*d*, *e*, *f*) als Folge von Flächen und im rechten Abbildungsteil (*g*, *h*, *i*) als Integalkurven.

Ein kontinuierliches Spektrum denkt man sich lückenlos in Wellenlängenbereiche konstanter Breite zerlegt, für die einzeln die Bestrahlungsstärke wiederum in Watt/cm^2 ermittelt wird. In der graphischen Darstellung trägt man diese Bestrahlungsstärken wiederum als Striche auf, so daß das kontinuierliche Spektrum aus Strichen zusammengesetzt ist, die in konstantem Abstand voneinander angeordnet sind (Abb. 1b). Die Breite des Wellenlängenbereiches ist je nach der Art des kontinuierlichen Spektrums zu wählen. Je mehr Einzelheiten das Spektrum aufweist, um so feiner erfolgt die Unterteilung, damit diese Feinheiten nicht verloren gehen. Die gesamte Bestrahlungsstärke über das gesamte Spektrum ergibt sich wiederum als die Summe der einzelnen Strichlängen.

Die vielfach verwendete Breite von $1\text{ m}\mu$ für den Wellenlängenbereich ist bereits so klein, daß sie bei der graphischen Darstellung nicht angewendet werden kann, so daß diese Art der Darstellung in den meisten Fällen nicht zweckmäßig ist. Außerdem wird die Aufteilung des Spektrums in einzelne Striche als unnatürlich empfunden.

Die dem Wesen des kontinuierlichen Spektrums am besten entsprechende Wiedergabe besteht darin, daß man die Bestrahlungsstärke der einzelnen Wellenlängenbereiche über einem linearen Wellenlängenmaßstab als flächenhafte Balken darstellt, wie dies in Abb. 1 e geschehen ist. Die Fläche eines Balkens ist ein Maß für die dem entsprechenden Spektralbereich zukommende Bestrahlungsstärke. Diese wird also durch ein Produkt aus der Größe E und $\Delta\lambda$ dargestellt, wobei die letztere Größe die Breite des Spektralbereiches angibt und die Dimension einer Länge hat, während die Größe E zunächst als reine Rechengröße zu betrachten ist. Damit das Produkt aus E und $\Delta\lambda$ die Dimension der Bestrahlungsstärke (Watt/cm²) bekommt, muß die Größe E die Dimension Watt/cm³ haben. Man bezeichnet deshalb die Größe E als Bestrahlungsstärke pro Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$. Während die Dimension stets Watt/cm³ ist, hängen die Zahlenwerte davon ab, welchen Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ man zugrunde legt. Oft wird $\Delta\lambda = 1\text{ cm}$ gewählt, während wir im folgenden stets $\Delta\lambda = 1\text{ m}\mu$ setzen. Um die in Watt/cm² pro Wellenlängenbereich 1 cm — wofür man auch Watt/cm³ schreibt — angegebene Bestrahlungsstärke in Watt/cm² pro $1\text{ m}\mu$ umzurechnen, sind die Ordinatenwerte um den Faktor 10^7 zu verkleinern. Es gilt also: $50\text{ Watt/cm}^3 = 50 \cdot 10^{-7}\text{ Watt/cm}^2$ je $1\text{ m}\mu = 5\ \mu\text{Watt/cm}^2$ je $1\text{ m}\mu$. Das Spektrum ergibt sich bei der Abb. 1 e als die Summe der lückenlos aneinandergereihten Balken. Wenn man nun solche Feinheiten im Spektrum darstellen muß, daß es schwierig wäre, die Balken einzeln anzugeben, kann man auf ihre Wiedergabe verzichten. Man zeichnet dann nur noch die die Balken umschließende Kurve, bei der bei genügend kleiner Wahl von $\Delta\lambda$ die Treppen natürlich nicht mehr in Erscheinung treten. Auch wenn man in einem derartigen Fall die einzelnen Balken nicht mehr zeigt, ist unbedingt zu beachten, daß nicht die Kurve, sondern die zwischen Kurve und Abszissenachse liegende Fläche als Maß für die Bestrahlungsstärke angesehen werden muß.

In derselben Darstellungsweise kann auch ein Linienspektrum wiedergegeben werden (Abb. 1 d), wobei die den einzelnen Linien zugehörige Bestrahlungsstärke als flächenhafter Balken dargestellt wird. Man wird die Breite des Balkens so wählen, daß selbst die am engsten benachbarten Linien als getrennte Balken wiedergegeben werden können, sofern man nicht mehrere Linien in einen Balken zusammenfassen kann. Bei einem Linienspektrum ist also die Breite des Balkens eine beliebig zu wählende Rechengröße, die in keiner Beziehung zu der natürlichen Breite der Linie steht, die außerordentlich viel kleiner ist. Die Höhe der Balken hat die Dimension Watt/cm³, während für die Bezifferung der Ordinate das oben Gesagte gilt. Dieser Art der Darstellung der einzelnen Linien durch Balken entspricht das Bild, das man im Spektrographen erhält, wenn man den Eintrittspalt hinreichend breit wählt. Daher ist es weniger unnatürlich, das Linienspektrum als Folge zahlreicher breiter Balken darzustellen, als umgekehrt das kontinuierliche Spektrum gemäß Abb. 1 b als Folge einzelner Striche.

Die Vorteile der Darstellung nach Abb. 1 d und e zeigen sich besonders dann, wenn es sich darum handelt, ein Spektrum wiederzugeben, das außer dem Kontinuum einzelne Linien aufweist. Bei der flächenhaften Darstellung entsprechend den Abb. 1 d und 1 e werden die den Linien zugeordneten Balken auf die dem Kontinuum zugeordnete Fläche aufgesetzt, so daß sich ein Bild nach Abb. 1 f ergibt. Wenn man quantitativ angeben soll, welcher Anteil in den verschiedenen Spektralbereichen bei einer sowohl Kontinuum als Linienspektrum ausstrahlenden Strahlen-

quelle auf das Linienspektrum bzw. das Kontinuum entfällt, gibt Abb. 1f durch Vergleich der Flächen ein sinnfälliges Maß, während aus Abb. 1c das entsprechende Maß erst durch Addieren der den verschiedenen Spektren zugehörigen Strecken erhalten werden kann.

Es soll deshalb im folgenden bei der Darstellung kontinuierlicher Spektren oder zusammengesetzter Spektren stets die Darstellung gemäß Abb. 1e und f gewählt werden, während es sich bei Betrachtung von reinen Linienspektren empfiehlt, die Darstellung nach Abb. 1a zugrunde zu legen.

Auch wenn es sich um die Darstellung anderer Strahlungsgrößen, z. B. Strahlungsfluß (Watt), Strahldichte (Watt/cm^2) handelt, kann man zwischen der strecken- und flächenhaften Darstellung wählen, wobei wiederum wie oben für die Wahl der Darstellungsart dieselben Gesichtspunkte maßgebend sind. Die Dimension der Ordinate wird bei der flächenhaften Darstellung erhalten, wenn man die für die Strahlungsgröße selbst geltende Dimension durch cm dividiert. Die Dimension der Ordinate ergibt sich bei dieser Darstellung für den Strahlungsfluß zu Watt/cm und für die Strahldichte zu Watt/cm^3 .

Weniger gebräuchlich, aber in gewissen Fällen vorteilhaft, ist die integrale Darstellung. Bei dieser wird jeder Wellenlänge der Integralwert z. B. der Bestrahlungsstärke zugeordnet, wobei diese Größe zwischen der kurzwelligen Grenze λ_0 des Spektrums und der gerade betrachteten Wellenlänge λ summiert wird. In dieser Darstellung zeigt sich ein reines Linienspektrum als ein aus waagerechten und senkrechten Teilen bestehender Kurvenzug, da nur an der Stelle einer Spektrallinie die Summe einen Zuwachs erhält, wobei die Höhe des Sprunges gleich der von dieser Linie hervorgerufenen Bestrahlungsstärke ist. Ein kontinuierliches Spektrum ergibt eine gekrümmte, monoton ansteigende Kurve, wobei die Neigung der Kurve umso größer ist, je größer die Bestrahlungsstärke des Kontinuums ist. Sowohl beim Linienspektrum als auch beim Kontinuum ist die Bezeichnung der Ordinate die gleiche, nämlich W/cm^2 bei der Bestrahlungsstärke. Man kann infolgedessen ungezwungen ein aus Kontinuum und Linien gemischtes Spektrum darstellen. Der Vorteil der integralen Darstellung besteht darin, daß man die Bestrahlungsstärke eines Wellenlängenbereiches sofort aus der Abbildung entnehmen kann, der Nachteil darin, daß Feinheiten des Spektrums leicht unterdrückt werden. In Abb. 1h ist z. B. das doppelgipfelige Maximum von Abb. 1b bzw. 1e als solches nicht zu erkennen.

Bei der Darstellung eines kontinuierlichen Spektrums gemäß Abb. 1e und f ist unbedingt ein linearer Wellenlängenmaßstab anzuwenden. Wenn in besonderen Fällen dies nicht möglich ist, muß bei einer Änderung des Wellenlängen-Maßstabes auch der Ordinaten-Maßstab geändert werden. Legt man nämlich der Darstellung einen solchen Wellenlängen-Maßstab zugrunde, bei dem etwa die Wellenlängen nach großen Werten zu dichter zusammenrücken, so würde hierbei die Bestrahlungsstärke für den Bereich von $1\ \mu$ bei großen Wellenlängen einen schmäleren Balken ergeben als bei kleinerer Wellenlänge, bei der in der Darstellung die Wellenlängen weiter auseinanderliegen. Damit aber unbedingt jeder Balken ein Maß für die in den betreffenden Wellenlängenbereich fallende Bestrahlungsstärke ist, muß bei einer Veränderung des Wellenlängen-Maßstabes der Ordinaten-Maßstab, also die Höhe der Balken, in umgekehrtem Verhältnis geändert werden.

Wenn man also ein kontinuierliches Spektrum über einer logarithmischen oder reziproken Wellenlängenskala darstellt, darf die gleichzeitige Änderung des Ordinaten-Maßstabes, die für die einzelnen Wellenlängen verschieden ausfällt, nicht vergessen werden. Diese wellenlängenabhängige Änderung des Ordinaten-Maßstabes hat zur Folge, daß der Kurvenverlauf gegenüber der Darstellung über der linearen Wellenlängenskala ganz anders ausfällt. Insbesondere wird sein Maximum an einer

anderen Stelle liegen. Das Gleiche gilt für den Fall, daß man die spezifische Ausstrahlung nicht über der Wellenlänge, sondern über der Frequenz aufträgt, wobei man die spezifische Ausstrahlung dann für einen Frequenzbereich angibt. Zur Erläuterung ist in Abb. 2 eine spektrale Verteilung einmal über einer linearen Wellenlängenteilung und außerdem über einer linearen Frequenzteilung dargestellt. Die letztere stimmt mit einer reziproken Wellenlängenteilung überein. Man sieht, daß der Kurvenverlauf in beiden Fällen verschieden ist, und daß insbesondere die Lage des Maximums von der Wahl des Abszissenmaßstabes abhängt. Das ist dadurch begründet, daß man einmal die spezifische Ausstrahlung für den Frequenzbereich $\Delta\nu$, das andere Mal für den Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ bringt¹⁾. Jede andere Art der Darstellung, die den obigen Gesichtspunkten nicht Rechnung trägt, ist falsch. Da die Bezifferung der Ordinate bei einer nicht linearen, z. B. logarithmischen Wellenlängenteilung, Schwierigkeiten bereitet, sollte bei kontinuierlichen Spektren stets eine lineare Teilung angewendet werden. Bei der Integraldarstellung allerdings bestehen diese Beschränkungen nicht.

7. Wellenlängenabhängigkeit von Reflexion, Brechung, Streuung und Absorption.

Da nicht mit Strahlung einer einzigen Wellenlänge, sondern mit einem Spektrum zu rechnen ist, so ist es wichtig, zu prüfen, inwieweit die eingangs genannten Gesetzmäßigkeiten von der Wellenlänge abhängen. Für die Reflexion ergibt sich, daß der Winkel, unter dem der Strahl reflektiert wird, wellenlängenunabhängig ist, daß da-

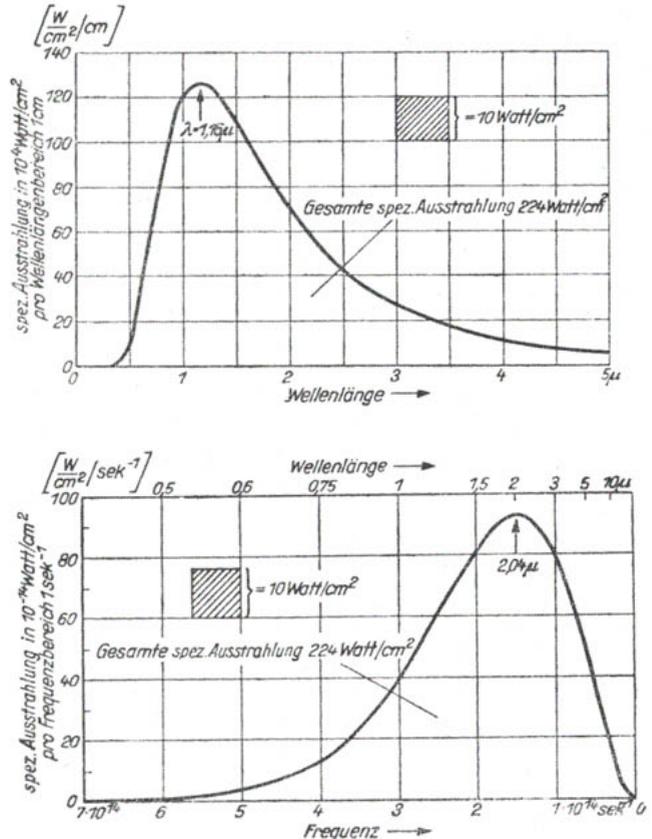


Abb. 2. Spektrale Energieverteilung eines schwarzen Körpers von $T = 2500^\circ \text{K}$, oben bezogen auf gleiche Wellenlängenbereiche, unten auf gleiche Frequenzbereiche. Die gesamte spezifische Ausstrahlung ist in beiden Fällen gleich. Der Maßstab wurde so gewählt, daß die zwischen Kurve und Abszissenachse liegende Fläche oben und unten die gleiche ist.

¹⁾ Bezeichnet man mit I_λ die Strahlenenergie je Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ und mit I_ν diejenige je Frequenzbereich $\Delta\nu$, so sind diese Größen durch die Gleichung $I_\lambda \cdot \Delta\lambda = I_\nu \cdot \Delta\nu$ verbunden. Aus der Gleichung $\nu = c/\lambda$ (vgl. 4) folgt durch Differenzieren für hinreichend kleine $\Delta\lambda$ und $\Delta\nu$: $\Delta\nu = -c \cdot \Delta\lambda/\lambda^2$. Aus diesen Werten ergibt sich $I_\lambda \cdot \Delta\lambda = I_\nu \cdot c \cdot \Delta\lambda/\lambda^2$ oder $I_\nu = I_\lambda \cdot \lambda^2/c$. Die Größe λ^2/c gibt an, wie sich im vorliegenden Beispiel die Ordinate ändert, wenn man von einer Darstellung über der Wellenlänge auf eine über der Frequenz übergeht. In entsprechender Weise erfolgt die Umrechnung, wenn zu der Darstellung über einer anderen Funktion der Wellenlänge übergegangen wird.

gegen das Verhältnis der reflektierten Energie zur auffallenden, das Reflexionsvermögen, von der Wellenlänge abhängt.

Bei der Brechung dagegen hängt auch die Größe der Ablenkung, die der Lichtstrahl beim Übergang in das andere Medium erfährt, von der Wellenlänge ab. Dieser Vorgang ist von großer praktischer Bedeutung: auf ihm beruht die Zerlegung eines Strahlungsgemisches in die einzelnen Wellenlängen mittels Prismen (Spektralapparat, Spektrometer, Monochromator). Normalerweise wird kurzwellige Strahlung stärker gebrochen als die längerwellige und dabei das Wellenband im kurzwelligen Teil stärker auseinandergezogen als im langwelligen. Diese Zerlegung durch Brechung heißt Dispersion.

Beim Durchgang durch ein Medium erfährt der Strahl eine wellenlängenabhängige Absorption. Das spektrale Absorptionsvermögen ist für eine chemische Substanz kennzeichnend und kann daher oft zu ihrer Bestimmung verwendet werden. Ausgewählte Substanzen bestimmter spektraler Absorption werden als Filter verwendet, um die Zusammensetzung eines Strahlungsgemisches in gewünschter Weise zu ändern.

Gehen optische Strahlen durch ein Medium, in dem kleine, meist kolloidale Teilchen suspendiert sind (z. B. Nebeltröpfchen oder Staub), so wird ein Teil der Strahlung aus der ursprünglichen Richtung unregelmäßig abgelenkt. Dieser Vorgang, der Streuung heißt, ist gleichfalls von der Wellenlänge abhängig. Er hängt außerdem von den mittleren Abmessungen der streuenden Teilchen ab. Der gleiche Vorgang findet auch an Molekülen statt.

Bei allen durch die Einwirkung von Strahlung auf die Materie hervorgerufenen Vorgängen physikalischer, photochemischer oder biologischer Art ist die Kenntnis der spektralen Absorption notwendig, da nach dem Grotthus-Draperschen Gesetz nur absorbierte Strahlung eine Wirkung hervorrufen kann. Die reflektierte oder durchgelassene Energie ruft keine Wirkungen hervor.

8. Lichtquanten. Es zeigt sich, daß man die Strahlungsvorgänge nicht erschöpfend erklären kann, wenn man das Licht lediglich als Wellenerscheinung betrachtet. Es erweist sich vielmehr als notwendig, anzunehmen, daß die Energie der Strahlung nicht beliebig unterteilt werden kann, sondern daß die Strahlungsenergie in „Energie-Atome“ aufgeteilt werden muß, die selbst nicht weiter teilbar sind. Diese nennt man Lichtquanten oder Energiequanten. Das einzelne Lichtquant besitzt um so mehr Energie, je größer die Frequenz, bzw. je kleiner die Wellenlänge der Schwingung ist. Der formelmäßige Ausdruck hierfür ist

$$(1) \quad Q = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Er besagt, daß die Energie Q eines Lichtquants gleich dem Produkt aus einer universellen Konstanten $h = 6,61 \cdot 10^{-33}$ Watt · sek², der sogen. Planckschen Konstanten, und der Frequenz ν ist¹⁾, bzw. aus der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sek und der Wellenlänge λ (in cm) berechnet werden kann. Die in einem Lichtquant von der Wellenlänge λ enthaltene Energie ist aus Abb. 3 zu entnehmen.



Abb. 3. Rechenstab zur Ermittlung der Energie Q eines Lichtquants von der Wellenlänge λ .

¹⁾ Die Größe h hat die Dimension Energie · Zeit, also einer Wirkung. Daher wird h auch das Wirkungsquantum genannt.

Um die Größe eines Lichtquants zu veranschaulichen, sei ein konkretes Beispiel überschlagsweise gerechnet. Ein Lichtquant der Wellenlänge $366 \text{ m}\mu$ hat $5,4 \cdot 10^{-19} \text{ Watt}\cdot\text{sek}$. Eine moderne Hg-Hochdrucklampe von 250 Watt Leistungsaufnahme strahlt von dieser Wellenlänge etwa 10 Watt in den Raum aus; in 1 m Abstand fallen also auf eine Fläche von 1 cm^2 etwa 10^{-4} Watt . Das sind demnach in der Sekunde rund $2 \cdot 10^{14}$ Lichtquanten der Wellenlänge $366 \text{ m}\mu$.

9. Physikalische Wirkungen. Zu welchen Vorgängen die absorbierte Energie führen kann, wird im folgenden gezeigt: Wir betrachten zunächst die physikalischen Umsetzungen. Beim Photoeffekt bewirkt die auf eine Metallfläche auffallende Strahlungsenergie einen Austritt von kleinsten, negativ geladenen elektrischen Ladungsträgern, den Elektronen, wobei der Austritt eines jeden Elektrons die Absorption eines Lichtquants zur Voraussetzung hat. Bei gleicher Zusammensetzung der Strahlung ist die Zahl der austretenden Elektronen, der Photostrom, proportional der Bestrahlungsstärke. Man benutzt daher den Photoeffekt vielfach in den Photozellen für Strahlungsmessungen. Der Photoeffekt ist ausgeprägt wellenlängenabhängig. Dieser, sich an der Oberfläche abspielende Vorgang läßt den inneren Aufbau der Materie unberührt im Gegensatz zum sog. inneren Photoeffekt, bei dem die Auslösung der Elektronen im Innern des bestrahlten Stoffes vor sich geht, wobei die Elektronen zunächst im bestrahlten Stoff verbleiben oder wandern. Als Folge treten unter Umständen chemische Umsetzungen ein.

Ein anderer Vorgang bei der Absorption der Strahlung, bei dem gleichfalls der bestrahlte Stoff keine dauernde Änderung erleidet, ist die Fluoreszenz. Fluoreszierende Stoffe sind imstande, Strahlung zu absorbieren und diese nach einer sehr kurzen Zeit als Fluoreszenzlicht wieder auszustrahlen. Dieses ist in seiner spektralen Zusammensetzung vielfach unabhängig von der spektralen Zusammensetzung der erregenden Strahlung und charakteristisch für den betreffenden Stoff, jedoch muß die Wellenlänge der erregenden Strahlung kleiner sein als die des Fluoreszenzlichtes (Gesetz von Stokes). Die absorbierte Strahlung kann bei bestimmten Stoffen auch, anstatt unmittelbar als Fluoreszenzstrahlung ausgesandt zu werden, aufgespeichert werden, um erst eine gewisse Zeit nach Beginn der Einwirkung der auftretenden, erregenden Strahlung allmählich als Licht in langsam abnehmender Helligkeit ausgestrahlt zu werden. Solche Stoffe nennt man Leuchtphosphore. Die Erscheinung heißt Phosphoreszenz. Fluoreszenz und Phosphoreszenz faßt man unter dem Begriff Lumineszenz zusammen.

Im günstigsten Fall kann für jedes absorbierte Lichtquant ein Lichtquant der Lumineszenzstrahlung ausgesandt werden. Die Beobachtung des für einen Stoff charakteristischen Lumineszenzlichtes erfolgt am besten bei ausschließlicher Erregung mit unsichtbarem UV, da das Auge in diesem Falle beim Betrachten des meist lichtschwachen Lumineszenzlichtes nicht durch die erregende Strahlung gestört wird. Nach diesem Prinzip arbeitet die Analysenlampe. Die Fluoreszenz wird in der Meßtechnik benützt, da die Fluoreszenzhelligkeit eines Leuchtstoffes als Maß für die Bestrahlungsstärke der auffallenden UV-Strahlung dienen kann. Neuerdings hat die Lumineszenz große praktische Bedeutung erlangt, da es mit ihrer Hilfe gelingt, UV-Strahlung in Licht umzuwandeln und auf diese Weise bei Hg-Lampen für Beleuchtungszwecke die Lichtausbeute zu erhöhen oder die Lichtfarbe in gewünschter Weise zu ändern.

Neben diesen spezifischen Vorgängen bei der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie gibt es noch einen unspezifischen Vorgang, der ebenfalls ohne Veränderung des bestrahlten Stoffes vor sich geht: der bestrahlte Körper kann sich erwärmen. Die Wärmewirkung kann für Meßzwecke verwendet werden, wenn der bestrahlte Körper alle Strahlung absorbiert und daher die Erwärmung dem auftretenden Strahlungsfluß proportional ist. In den meisten Fällen dagegen ist sie un-

erwünscht oder nebensächlich. Das zuerst Genannte gilt vor allem dann, wenn der zu untersuchende Vorgang temperaturabhängig ist.

10. Photochemische Wirkungen. Die wichtigste Wirkung absorbiert UV-Strahlung, auf der ein wesentlicher Teil ihrer Anwendung in Biologie und Technik beruht, ist jedoch die durch sie hervorgerufene photochemische Veränderung in den bestrahlten Körpern. Durch die Strahlungsabsorption können auch Reaktionen bewirkt werden, die unter Zuführung von Energie verlaufen. Im einzelnen sind also möglich: Spaltung, Anlagerung (Polymerisation), Umsetzung von Molekülen und Umwandlung von Isomeren. In der Technik sind zum Beispiel wichtig: die Photographie, die mit ihr verwandte Lichtpauserei, das Ausbleichen von Farbstoffen, die Bildung von Vitamin D aus Ergosterin, in der Biologie die zuletzt genannte Vitaminbildung im lebenden Körper, die Zelltötung, auf der die bakterientötende Wirkung beruht, die Beeinflussung des Stoffwechsels der lebenden Organismen. Alle diese Wirkungen werden in der Medizin teils einzeln, teils in Zusammenarbeit zur Heilung zahlreicher Krankheiten, wie z. B. der Rachitis oder der Tuberkulose, verwendet.

Die photochemische Reaktion zeichnet sich dadurch aus, daß die umgesetzte Menge nur abhängig von der absorbierten wirksamen Strahlenmenge, aber unabhängig von der Temperatur ist. Das ist verständlich, wenn man bedenkt, daß die bei Absorption eines Strahlenquants dem einzelnen Molekül oder einem Komplex aus mehreren Molekülen zugeführte Energie sehr viel größer ist, als die durch Temperaturerhöhung bewirkbare. Wegen der in einem solchen Fall bewirkten „Temperaturerhöhung“ spricht man von einer Punktwärme. Freilich unterscheidet sich der Mechanismus dieser „Temperaturerhöhung“ von den üblichen sehr wesentlich. Findet man aber bei photochemischen Prozessen einen Einfluß der Temperatur, dann ist dies ein Zeichen dafür, daß nicht ein einfacher Vorgang vorliegt, sondern als Folge der eigentlichen photochemischen Umsetzung Folgereaktionen eingetreten sind, in denen die durch den primären Lichtabsorptionsvorgang entstandenen Produkte mit den übrigen im System befindlichen Partnern weiter reagieren, und die ihrerseits, wie die gewöhnlichen chemischen Reaktionen, temperaturabhängig sind. Von diesen chemischen Folgereaktionen sind die Kettenreaktionen zu unterscheiden, die dann auftreten, wenn durch die Absorption des Strahlenquants ein Vorgang angestoßen wird, der unter Energieabgabe verläuft. Die dabei freiwerdende Energie kann durch Stoß an ein zweites Molekül abgegeben werden, dieses anregen und somit ebenfalls zur Reaktion befähigen. So folgt auf die Absorption eines einzigen Lichtquants eine Kette von Sekundärreaktionen. Diese Kettenreaktionen sind ungeheuer häufig; in ihnen spielt das absorbierte Lichtquant mehr die Rolle eines auslösenden Momentes.

Um einen Begriff von den bei photochemischen Umsetzungen möglichen Ausbeuten zu geben, soll unter Benutzung der in 8 gegebenen Daten eine willkürlich angenommene Umwandlung durchgerechnet werden. Es wird hierbei angenommen, daß die auffallende Strahlung absorbiert wird und pro absorbiertes Quant gerade ein Molekül neu gebildet wird, so daß demnach bei einer Bestrahlungsstärke von $2 \cdot 10^{14}$ Quanten/cm² · sek und einer bestrahlten Oberfläche von 100 cm² in der Sekunde $2 \cdot 10^{16}$ Moleküle entstehen. Da ein Mol jeder Substanz $L = 6 \cdot 10^{23}$ Moleküle ($L =$ Loschmidtsche Zahl) enthält, würden somit in der Sekunde $3 \cdot 10^{-8}$ Mol entstehen. Dies entspricht bei einem Molekulargewicht von 100 einer Masse von $3 \cdot 10^{-6}$ g/sek oder 10 mg/Std. Obwohl diese Mengen vielleicht recht klein erscheinen, sind sie unter Umständen doch wichtig und imstande, große Wirkungen hervorzurufen. Einerseits weil — z. B. bei den Vitaminen — schon kleine Mengen genügen, die erstrebte Wirkung hervorzurufen, andererseits weil — z. B. bei der Bestrahlung des Menschen — mit einer großen Oberfläche gerechnet werden kann.

Wenn man annimmt, daß die spezifische Wärme des bestrahlten Stoffes 0,3 ist, erfährt ein Molekül beim angenommenen Molekulargewicht 100, also von der absoluten Masse $1,65 \cdot 10^{-22}$ g durch Absorption eines Strahlenquants der Wellenlänge 366 m μ einen Energiezuwachs, der einer „Temperaturerhöhung“ um 2600° C entsprechen würde.

Von großer Wichtigkeit ist bei der Einwirkung von Strahlung auf Materie die als Sensibilisation bezeichnete Erscheinung. Durch Zusatz eines Sensibilisators zum reagierenden System werden an sich nicht wirksame Wellenlängen wirksam gemacht. Der Sensibilisator nimmt dabei an der Reaktion nicht teil. Er dient zur Übertragung der von ihm absorbierten Energie auf die Reaktionspartner. In der Biologie ist diese Erscheinung z. B. bei verschiedenen Überempfindlichkeitskrankheiten gegen Licht wichtig, bei denen angenommen wird, daß ein im Blut vorhandener Farbstoff (Hämatoporphyrin) als Sensibilisator wirkt.

Kapitel II

Erzeugung von UV-Strahlen

11. Möglichkeiten der UV-Erzeugung. Die Erzeugung von UV-Strahlen ist auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen möglich. Man benutzt entweder die Strahlung hoch erhitzter fester Körper oder elektrisch angeregter Gase oder Dämpfe. Strahlenquellen der ersten Art faßt man unter dem Begriff Temperaturstrahler zusammen. Zu ihnen gehören die Glühlampen in ihren verschiedenen Ausführungsformen. Diese Strahler senden ein kontinuierliches Spektrum aus, dessen UV-Anteil jedoch im allgemeinen sehr gering ist, so daß sie als UV-Strahler nur selten verwendet werden. Die Strahlung von elektrisch angeregten Gasen oder Dämpfen wird in den Gasentladungsstrahlern ausgenützt. Ein typischer Vertreter ist die Quecksilberlampe. Das Spektrum der Gasentladungsstrahler besteht vorwiegend aus Linien. Da eine große Zahl von Gasen und Dämpfen bei Anregung einen erheblichen Energieanteil im UV liefert, haben unter den UV-Strahlern die Gasentladungslampen die größte technische Bedeutung. Offene Bogenlampen mit abbrennenden Elektroden nehmen eine Zwischenstellung ein, da bei ihnen sowohl die Temperaturstrahlung der Elektroden als auch die Strahlung der Gasentladung eine Rolle spielt.

Um das Verständnis der elektrischen und spektralen Eigenschaften der Gasentladungsstrahler zu erleichtern, werden einige allgemeine Betrachtungen über die physikalischen Vorgänge in Gasentladungen vorausgeschickt.

A. Gasentladungsstrahler

a) Grundsätzliches zur Gasentladung [143, 188, 216, 276, 291]

12. Lichterscheinungen in der Gasentladung. Legt man an die Elektroden in einem abgeschlossenen zylindrischen Glasrohr eine Gleichspannung von mehreren 100 Volt, so geht — wenn der Gasdruck einige Torr¹⁾ beträgt — zwischen den Elektroden eine Entladung über. Vor der negativen Elektrode, Kathode genannt, liegt eine leuchtende Schicht, das negative Glimmlicht. Zwischen Glimmlicht und Kathode liegt meist ein Dunkelraum, über dessen Bedeutung später in 16 zu sprechen sein wird. An das Glimmlicht schließt sich im allgemeinen in Richtung zur positiven Elektrode, der sog. Anode, die positive Säule an, die oft einen großen Teil des Querschnittes des Entladungsgefäßes mit einem gleichmäßigen Leuchten erfüllt.

¹⁾ 1 Torr = 1 mm Quecksilbersäule = 1 mm Hg, zum Teil auch als tor bezeichnet.

Die Größe und Gestalt der einzelnen Leuchtgebilde hängt im wesentlichen vom Druck des Füllgases ab, während die Farbe der Lichterscheinungen vor allem von der Art der Gasfüllung abhängt und für jede Gasfüllung charakteristisch ist. Zur Strahlungsaussendung wird vorwiegend die positive Säule und nur selten das Glimmlicht herangezogen.

13. Entladungsträger. Die Träger der Entladung sind kleinste elektrisch geladene Masseteilchen, die Elektronen und Ionen. Die Elektronen sind negativ geladen. Ihre Ladungsmenge ist die kleinste bekannte Elektrizitätsmenge (Elementarladung). Die Ionen dagegen bestehen entweder aus Atomen oder Molekülen, die ein oder mehrere Elektronen abgegeben haben und daher positiv geladen sind, oder aus solchen, die ein oder mehrere Elektronen zusätzlich gebunden haben (negative Ionen). Ihre Masse ist daher mehrere Größenordnungen (2000 bis 400 000 mal) größer, ihre Bewegung infolgedessen viel träger als die der Elektronen. Der Entladungsstrom ist daher überwiegend ein Konvektionsstrom von Elektronen, die sich an der relativ nahezu stillstehenden, tatsächlich aber langsam zur Kathode wandernden Ionenwolke vorbeibewegen, obwohl die Zahl der positiven Ionen je cm^3 der positiven Säule etwa gleich der Zahl der Elektronen ist. In den Metallampf- und Edelgasentladungen, die später vorwiegend behandelt werden, treten überwiegend Elektronen und positive Ionen, jedoch kaum negative Ionen auf.

14. Anregung und Trägerbildung. Die aus der Kathode austretenden Elektronen werden durch das zwischen den Elektroden befindliche elektrische Feld beschleunigt. In der Gasfüllung der Entladungsröhren stoßen die Elektronen auf ihrem Wege zur Anode mit den Atomen oder Molekülen des Gases zusammen. Ist die Elektronengeschwindigkeit klein, so erfolgen die Zusammenstöße elastisch, d. h. das Elektron verliert dabei keine Energie. Es ändert nur seine Bewegungsrichtung. Von einer bestimmten Geschwindigkeit der Elektronen ab gibt aber das Elektron seine Bewegungsenergie beim Zusammenstoß an das getroffene Atom ab, das dadurch in einen angeregten Zustand¹⁾ gerät. Nach einer sehr kurzen Zeit gibt das Atom die aufgenommene Energie in Form von Strahlung ab. Dieser Vorgang stellt die wesentlichste Art der Lichterzeugung in der Gasentladung dar. Ist die Geschwindigkeit des Elektrons noch größer, dann vermag es sogar ein Elektron aus dem Atom herauszuschlagen, so daß das Atom zu einem positiven Ion wird. Nach dem Zusammenstoß und nach der Abgabe seiner Energie an ein Atom beginnt das Elektron von neuem seinen Flug mit geringer Geschwindigkeit und wird durch das elektrische Feld beschleunigt, um wiederum kurze Zeit später seine Energie an ein anderes Atom abzugeben, wenn seine Geschwindigkeit groß genug geworden ist. Infolge der zahlreichen Zusammenstöße bewegt sich das Elektron in unregelmäßigen Zickzackbahnen in vielfachen Umwegen von der Kathode zur Anode und erzeugt dabei zwischen zahlreichen elastischen und nicht ionisierenden Zusammenstößen bei einer Anzahl von ionisierenden Zusammenstößen eine große Zahl von Ladungsträgern, die ihrerseits nach denselben Gesetzmäßigkeiten das elektrische Feld durchlaufen.

In entgegengesetzter Richtung wie die eben geschilderte Trägererzeugung läuft der Vorgang der Trägervernichtung. Die Elektronen vereinigen sich mit den positiven Ionen vor allem an den den Entladungsraum begrenzenden Wänden, sowie auch in geringem Maße im Gasraum, unter gegenseitigem Ladungsaustausch zu neutralen Gasatomen. Diesen Vorgang nennt man Rekombination.

¹⁾ Nach dem Bohrschen Atommodell besteht ein Atom aus einem positiv geladenen Kern, um den Elektronen auf bestimmten Bahnen kreisen. Wird nun dem Atom Energie zugeführt, etwa durch Stoß von Elektronen, so springt ein Elektron des Atoms auf eine entferntere Bahn. In diesem Zustand nennt man das Atom angeregt. Die bei der Rückkehr des Elektrons zur Grundbahn freiwerdende Energie wird als Strahlung ausgesandt.

In jeder Gasentladung findet eine fortgesetzte Erzeugung von Ionen und Elektronen statt, die sich im elektrischen Feld bewegen und dabei die Stromleitung durch den Gasraum besorgen. Diese erfolgt vorwiegend durch die Elektronen wegen ihrer größeren Beweglichkeit. Im Gleichgewichtszustand ist dann die Zahl der in der Zeiteinheit neugebildeten Ladungsträger gleich der Zahl der verschwindenden Ladungsträger. Es werden also viel mehr Elektronen als positive Ionen in der Zeiteinheit erzeugt.

15. Zündspannung. Klemmenspannung. Auf Grund dieser Anschauungen ergibt sich zwanglos eine wichtige Eigenschaft der Gasentladungen. Ein Gasraum ist nämlich an sich ein Isolator. Infolge äußerer Einflüsse (Höhenstrahlung, Radioaktivität) werden fortwährend einige wenige Ionen oder Elektronen gebildet. Ist die an den Elektroden liegende Spannung verhältnismäßig niedrig, so werden die im Gasraum vorhandenen Ladungsträger zu den Elektroden hin bewegt, ohne daß sie indessen unterwegs neue Ionen zu erzeugen imstande sind. Dieser Strom der stillen Vorentladung ist so schwach, daß er nur mit sehr empfindlichen Strommessern nachgewiesen werden kann. Steigert man allmählich die Spannung an den Elektroden, so werden nunmehr die jeweils vorhandenen Ladungsträger so weit beschleunigt, daß sie das neutrale Gas zu ionisieren vermögen. Die neu entstandenen Ionen und Elektronen ihrerseits bewegen sich ebenfalls unter dem Einfluß der Spannung zwischen den Elektroden, genau wie die ursprünglich vorhandenen Ladungsträger. Oberhalb eines bestimmten Grenzwertes, der Zündspannung, nimmt die Neubildung von Ionen lawinenartig sehr rasch zu, bis der Strom so groß ist, wie er mit Rücksicht auf die im Stromkreis befindlichen Widerstände und die Ergiebigkeit der Stromquelle sein kann. Es ergibt sich also die grundlegende Eigenschaft einer selbständigen Gasentladung, daß sie stets zum Betrieb eine gewisse Mindestspannung benötigt. Diejenige Mindestspannung, die zur allerersten Einleitung der Entladung erforderlich ist, nennt man die Zündspannung. Sie hat die größte praktische Bedeutung, da sie eine untere Grenze für die äußere Betriebsspannung darstellt, die aber im praktischen Betrieb aus Gründen der Sicherheit erheblich überschritten werden muß.

Wenn die Entladung eingesetzt hat, so ist die zur weiteren Aufrechterhaltung derselben benötigte Klemmenspannung wesentlich niedriger. Sie muß aber stets noch so hoch sein, daß die Elektronen auf ihrem Weg zur Anode genügend beschleunigt werden, damit sie die Gasfüllung ausreichend ionisieren können. Die beiden erwähnten Mindestspannungen (Zündspannung, Klemmenspannung) hängen von der Art der Gasfüllung, dem Gasdruck und Rohrdurchmesser, Länge und Form der Entladungsröhre ab, ferner von der Beschaffenheit und dem Zustand der Kathode. Je leichter ein Gas zu ionisieren ist, um so niedriger ist die zum Betrieb erforderliche Mindestspannung. In Abhängigkeit vom Gasdruck ergibt sich ein Minimum der Klemmenspannung und eines der Zündspannung. Dieses Minimum liegt bei um so größerem Druck, je kleiner der Elektrodenabstand ist, während eine Vergrößerung des Durchmessers der Entladungsröhre in umgekehrtem Sinn wirkt. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis wird bei Entladungsröhren der Gasdruck so gewählt, daß die Zündspannung möglichst niedrig ist.

16. Austrittsarbeit und Kathodenfall. Der Einfluß der Kathode ist sowohl in theoretischer als auch praktischer Hinsicht von besonderer Bedeutung, so daß die Verhältnisse an der Kathode ausführlich behandelt werden müssen. Für die im Innern der Kathode befindlichen Elektronen wirkt die Kathodenoberfläche als Wehr, das nur von denjenigen Elektronen überschritten werden kann, die infolge ihrer Temperaturbewegung eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit besitzen. Die Geschwindigkeit der Elektronen hängt von der Temperatur der Kathode ab. Bei kalten Elektroden reicht sie infolge der niedrigen Temperatur nicht für den Austritt aus der

Kathodenoberfläche aus. Auf Kosten der Energie der positiven Ionen können die im Innern der Elektrode befindlichen Elektronen die Oberfläche verlassen. Diese Art der Elektronenerzeugung erlaubt jedoch nur eine kleine Stromdichte einer Kathode zu entnehmen. Später (in 17) werden bessere Verfahren zur Lieferung von Elektronen besprochen.

Die für den Austritt eines Elektrons erforderliche Energie nennt man die Austrittsarbeit. Da die zu überwindende Kraft den gleichen Einfluß auf das Elektron ausübt wie ein elektrisches Gegenfeld, kann man die Größe der Austrittsarbeit durch diejenige Spannung eines Gegenfeldes kennzeichnen, dessen Überwindung der Austrittsarbeit des Elektrons gleichwertig ist. Die Austrittsarbeit, die daher in Elektronen-Volt angegeben wird, ist eine Stoffkonstante, die stark von der Oberflächenbeschaffenheit, z. B. Gasbeladung, Oxydation, abhängt. Sie beträgt (vgl. Tabelle 1) 0,5 bis 10 Elektronen-Volt und ist am niedrigsten bei den Alkalimetallen und Erdalkalimetallen. Je niedriger die Austrittsarbeit, um so größere Stromdichten sind an einer kalten Kathode zulässig.

Tabelle 1
Kathodenfall und Austrittsarbeit [143]

Elektroden- Werkstoff	Kathodenfall bei Ent- ladung an kalten Elek- troden		Elektronen-Aus- trittsarbeit ¹⁾ Elektronen-Volt
	in Argon Volt	in Neon Volt	
Aluminium	100	120	1,8—4,0
Barium	93	—	1,6—2,3
Bariumoxyd	—	—	1,0
Eisen	165	150	3,9—4,8
Kalium	64	68	0,5—2,0
Kalzium	93	86	1,7—3,3
Magnesium	119	94	1,8—3,7
Molybdän	—	115	3,2—4,3
Natrium	—	75	1,8—2,1
Nickel	131	140	3,7—4,6
Platin	131	152	3,6—6,5
Quecksilber	—	—	4,0—4,75
Strontium	93	—	1,8—2,15
Wolfram	—	125	4,3—5,4

Die aus der Kathode austretenden Elektronen haben zunächst eine sehr kleine Geschwindigkeit. In dem Maße, wie sie sich von der Kathode entfernen, bewegen sie sich schneller und erst in einer bestimmten Entfernung von der Kathode haben sie die Geschwindigkeit erreicht, die sie zur Ionisierung befähigt²⁾.

Der vor der Kathode liegende Spannungsabfall, der sowohl die oben erwähnte Austrittsarbeit als auch den Spannungsabfall im Dunkelraum umfaßt, heißt Kathodenfall. Es zeigt sich, daß die Größe dieses Kathodenfalles fast nicht von der Anordnung und dem Abstand der Elektroden und vom Gasdruck abhängt. Er liegt vielmehr für ein bestimmtes Kathodenmaterial und eine Gasfüllung fest (vgl. Tabelle 1).

¹⁾ Die an zweiter Stelle angeführten Werte gelten für die reinen Metalle, während die erste Zahl eine in der Mehrzahl der Fälle durch Oberflächenschichten verkleinerte Austrittsarbeit darstellt.

²⁾ Die geringe Geschwindigkeit der Elektronen in der Nähe der Kathode erklärt auch den sog. Dunkelraum, in dem nämlich die Elektronengeschwindigkeit nicht einmal zur Anregung der Gasatome zum Leuchten ausreicht.

Bei Edelgasen ist der Kathodenfall bei allen in Frage kommenden Kathodenwerkstoffen kleiner als 220 Volt. Dadurch erklärt sich, daß man die edelgasgefüllten Glimmlampen an den üblichen Netzspannungen betreiben kann. Der Kathodenfall stellt eine untere Grenze für die kleinstmögliche Klemmenspannung einer selbständigen Gasentladung dar. Beträgt z. B. der Kathodenfall von Aluminium in Neon 120 Volt, so kann auf keine Weise eine Entladung an Aluminiumelektroden mit einer kleineren Spannung als 120 Volt erhalten werden. Es ist zu erwähnen, daß der Kathodenfall bei einem bestimmten Werkstoff genau so wie die Austrittsarbeit von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt und daher in der Praxis mit erheblicher Streuung bei den in der Tabelle 1 angeführten Werten zu rechnen ist. Die Zahlentafel läßt weiterhin erkennen, daß für Netzspannungen unter 110 Volt nur die Alkali- und Erdalkalimetalle als Kathode in Frage kommen. Da aber Alkalidämpfe die meisten Gläser angreifen, werden vorwiegend die Erdalkalimetalle zur Herabsetzung der Austrittsarbeit bei Kathoden verwendet, und zwar als Überzug auf Elektroden aus festen Metallen, z. B. Eisen, Nickel, Wolfram oder Molybdän. Die Drahtkathoden der 110-Volt-Glimmlampen tragen an ihrer Oberfläche eine Schicht von aufgedampftem Barium, das die Zündung bei der genannten Spannung ermöglicht.

17. Glühkathode, Oxydkathode. In einer Entladungsröhre mit kalten Elektroden ist der Kathodenfall sehr hoch. Daher kann eine solche Entladung nur mit niedriger Stromdichte betrieben werden, da sonst die Wärmeerzeugung an der Kathode zu groß ist und die Kathode schmelzen würde. Die Wärmeerzeugung an der Kathode ist nämlich durch die Größe $V_k \cdot i$ gegeben, wenn V_k der Kathodenfall und i die Stromstärke bezeichnet. Nimmt man z. B. eine Glimmentladung in Neon mit Eisenelektroden ($V_k = 150$ V) an, so würden bei einer Stromstärke von 0,2 A an der Kathode $150 \text{ V} \times 0,2 \text{ A} = 30 \text{ W}$ umgesetzt werden, welche durch Abstrahlung der aus diesem Grunde großflächig ausgebildeten Elektroden abgeführt werden. Würde man die Röhre mit einem größeren Strom, etwa 2 A betreiben, so stiege die Belastung der Kathode stark an und zwar auf 300 W. Einer solchen Leistung läßt sich jedoch die Größe der Elektrode nicht anpassen. Will man mit größeren Stromstärken arbeiten, so besteht der einzige Ausweg zur Herabsetzung des Wärmeumsatzes an der Kathode in der Erniedrigung des Kathodenfalles.

Der Kathodenfall kann nun sehr stark erniedrigt werden, wenn man Glühkathoden verwendet, die bei einer hohen Temperatur arbeiten können. Bei hoher Temperatur der Kathode wird die kinetische Energie der Elektronen so groß, daß die Elektronen die sie zurückhaltenden Kräfte überwinden können. Elektroden dieser Art, die eine thermische Elektronenemission aufweisen, können für sehr hohe Stromstärken (100 A und mehr) gebaut werden.

Die Heizung der Elektrode kann durch einen besonderen Heizstrom erfolgen, doch zieht man heute bei Entladungslampen im allgemeinen vor, die Heizung durch den Entladungsstrom selbst vornehmen zu lassen, weil man dann auf eine zusätzliche Stromzuführung verzichten kann.

Die Temperatur, die zur thermischen Elektronenemission nötig ist, hängt bei gegebener Stromstärke und Elektrodenoberfläche vom Werkstoff der Kathodenoberfläche ab. Bei den meisten reinen Metallen sind sehr hohe Temperaturen von 2000 bis 2500° C erforderlich, so daß nur hochschmelzende Metalle, wie Wolfram und Molybdän, für solche Glühkathoden Verwendung finden können. Bei den Erdalkalimetallen Barium, Strontium und Kalzium dagegen kommt man bereits mit Temperaturen von 800 bis 900° C aus. Die bei verschiedenen Temperaturen und Werkstoffen bei 1 cm² Kathodenoberfläche erreichbaren Elektronenemissionen sind aus Abb. 4 zu entnehmen, in der die Arbeitsbereiche durch stärkere Strichdicke hervorgehoben sind. Bei Glühkathoden liegt der Kathodenfall unterhalb von 10 Volt,

so daß bei ihnen der Leistungsumsatz an der Kathode (Kathodenfall mal Stromstärke) auch bei größeren Stromstärken in erträglichen Grenzen bleibt.

Nach einem Vorschlag von Wehnelt bildete man die Glühkathode als elektrisch geheiztes Band aus Platin aus, das mit Erdalkalioxyden bedeckt war. Obgleich man später erkannte, daß die Emission der Elektronen ausschließlich auf das Erdalkalimetall zurückzuführen ist und nicht auf die betreffenden Oxyde, blieb nach der ersten Ausführungsform die Bezeichnung Oxydkathode erhalten. Daneben ist die Bezeichnung Wehnelt-Kathode oder aktivierte Elektrode üblich. Das Trägermetall ist bei diesen Kathoden von geringerer Bedeutung.

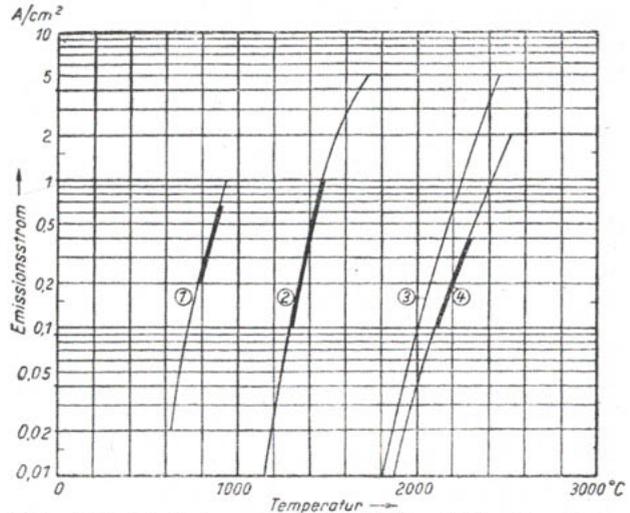


Abb. 4. Der Emissionsstrom je cm^2 Oberfläche einer Glühkathode für BaO- und SrO-Paste auf Platin (1), Thorium auf Wolfram (2), Molybdän (3) und Wolfram (4) in Abhängigkeit von der Temperatur der Kathode. Nach Espe und Knoll [144].

18. Feldkathode und Bogenkathode. Auch bei Verwendung von Quecksilber als Kathode ist eine Erhöhung der Stromstärke auf 1 A und beliebig mehr möglich, obwohl hierbei keine thermische Emission auftritt. Bei der Hg-Elektrode liefern andere Vorgänge die erforderlichen Elektronen. Es entstehen nämlich an der Ansatzstelle der Entladung sehr starke elektrische Kräfte, die aus der Metalloberfläche Elektronen herausreißen. Kathoden, die nach diesem Grundsatz arbeiten, nennt man Feldkathoden. Nach einer neueren Auffassung (vgl. [296a]) arbeitet die Bogenkathode so, daß der Stromtransport in unmittelbarer Nähe der Kathode ausschließlich durch Ionen erfolgt, die aus einem Gebiet der Gasentladung stammen, in dem infolge der sehr hohen Temperatur des Lichtbogens durch thermische Ionisation des Gases eine ausreichende Trägererzeugung stattfindet. Als wesentlich erkennt man bei diesen Bogenkathoden die scharfe Einschnürung des Lichtbogens unmittelbar vor der Kathode zu einem scharfen Brennfleck. Dieser ruft wohl eine starke Temperaturerhöhung der Kathode hervor, aber die hierdurch (z. B. an Elektroden aus hochschmelzenden Stoffen wie Wolfram oder Kohle) bewirkte glühelctrische Emission ist nicht ausreichend, den Bogenstrom zu tragen und für die Bogenkathode nicht wesentlich.

19. Glimmentladung, Bogenentladung. Je nach den Vorgängen an der Kathode — hoher oder niedriger Kathodenfall — sind zwei Hauptformen der Entladung zu unterscheiden. Die Glimmentladung mit hohem Kathodenfall ist dadurch gekennzeichnet, daß die Ladungsträger vorwiegend durch Trägerstoß — sei es der Elektronen oder Ionen — erzeugt werden, und zwar sowohl an der Kathode, als auch im Gasraum. Die Temperatur der Kathode ist im allgemeinen nicht erhöht. Die Stromdichte an der Kathode ist sehr niedrig (einige mA/cm^2). Von der Glimmentladung ist die Bogenentladung zu unterscheiden, bei der die Kathode — etwa infolge der erhöhten Temperatur — einen wesentlichen Teil der Ladungsträger erzeugt. Die kathodische Stromdichte kann bis zu $1000 \text{ A}/\text{cm}^2$ und mehr betragen.

Beispiele für eine Bogenentladung sind die Kohlenbogenlampe und die Quecksilberlampe.

Eine Bogenentladung kann sich nur dann ausbilden, wenn die Kathode befähigt ist, entweder als Glüh- oder Bogenkathode zu arbeiten. Der Hg-Lichtbogen, sowie alle anderen Metaldampfbogen, können sowohl mit der einen, als auch mit der anderen Kathode arbeiten, ohne daß sich dies in der ausgesandten Strahlung bemerkbar macht.

Die Zündung der Bogenentladung kann auf dreierlei Art erfolgen: durch Kontakt der Elektroden, Fremdheizung der Glühkathode oder auf dem Wege über eine Glimmentladung. Bei der Kontaktzündung werden beide Elektroden bis zur Berührung genähert oder durch eine leitende Verbindung überbrückt, z. B. durch einen Hg-Faden. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt bei Aufhebung der Verbindung bzw. der Berührung. Bei Metaldampfbogenlampen mit durch die Entladung aufgeheizten Glühkathoden benutzt man den dritten Weg, den der Glimmentladung, vgl. auch 30. Man füllt das Entladungsgefäß mit einem Edelgas von einigen Torr Druck als Zündgas. Beim Anlegen der Netzspannung bildet sich eine Edelgasglimmentladung an den noch kalten Elektroden aus, die allmählich zu einer Erwärmung der Elektroden und Verdampfung des den Lichtbogen tragenden Metalls führt, so daß die Glimmentladung in eine Bogenentladung umschlägt. Dieser Vorgang ist meist innerhalb einer Sekunde¹⁾ abgeschlossen.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde vorausgesetzt, daß die Entladungsröhre mit Gleichstrom betrieben wird. In der Praxis spielt aber gerade der Betrieb mit Wechselstrom eine wichtige Rolle. Dieser ist bei einer Glimmentladung im allgemeinen möglich. Bei gleicher Ausbildung der beiden Elektroden arbeiten sie abwechselnd als Kathode, bzw. Anode. Für eine Bogenentladung mit thermischen Elektroden gilt das gleiche. Dagegen läßt sich eine Bogenentladung mit Feldkathoden nur unter besonderen Bedingungen mit Wechselstrom betreiben, etwa durch Anwendung von Spannungen oberhalb von 600 Volt.

20. Positive Säule, Gradient. Da die Strahldichte des negativen Glimmlichtes gering ist, wird bei den praktischen Anwendungen als UV-Strahler allein die von der positiven Säule ausgesandte Strahlung ausgenutzt. In der positiven Säule findet die Anregung der Atome und die Aussendung von Strahlung statt. Dies bedingt einen Verbrauch von Energie in der positiven Säule. Außerdem erfolgt eine dauernde Erzeugung von Ladungsträgern, die sich zum Teil an der Wandung wieder neutralisieren, wodurch diese erwärmt wird. Dieser Vorgang erfordert ebenfalls Zuführung von Energie. Man hat festgestellt, daß in der positiven Säule einer gegebenen Gasentladung die je cm Länge verbrauchte Leistung (die sogen. spezifische Leistung, gemessen in Watt/cm) längs der ganzen Entladungsbahn konstant und für den Entladungsvorgang und die Strahlenemission kennzeichnend ist. Der Wattverbrauch je cm Entladungsbahn hängt von der Gasart, sowie vom Gasdruck, von Stromstärke und Rohrdurchmesser ab. In vielen Fällen gibt man aber den Quotienten aus spezifischer Leistung und Stromstärke an, der den Spannungsabfall je cm Entladungsbahn, den sogen. Gradienten, darstellt, der in Volt/cm gemessen wird. Der Gradient hängt von den gleichen Größen ab wie die spezifische Leistung.

Bei unedlen Gasen, Wasserstoff, Luft, Stickstoff, ist der Gradient wesentlich größer als bei Edelgasen und Metaldämpfen. Die Abhängigkeit des Gradienten vom Druck ist sehr groß. Bei sehr kleinem Gasdruck hat man hohe Gradientenwerte, weil die Elektronen große Gasstrecken durchfliegen müssen, bevor sie ein Gasteilchen

¹⁾ Hiervon ist der Einbrennvorgang 50 zu unterscheiden, der wegen des allmählichen Anstiegs des Metaldampfdruckes auf den Betriebswert mehrere Minuten dauert.

treffen und ionisieren können. Läßt man den Gasdruck ansteigen, dann werden die ohne Zusammenstoß zu durchfliegenden Strecken kürzer und die Ionisierung tritt häufiger ein, so daß der Gradient sinkt. Steigt aber der Druck weiter an, so werden die Zusammenstöße der Elektronen mit den Gasteilchen schließlich so häufig, und der Anteil der dabei jeweils verlorenen Elektronenenergie so groß, daß der Gradient dann wieder ansteigt. Weniger ausgeprägt ist die Abhängigkeit des Gradienten von der Stromstärke und vom Rohrdurchmesser. Mit größer werdender Stromstärke oder wachsendem Rohrdurchmesser nimmt der Gradient ab. Diese Verhältnisse werden für den technisch wichtigen Fall der Hg-Entladung in 32 ausführlich besprochen.

Die Kenntnis des Gradienten ist z. B. bei Quecksilberlampen wichtig, um sich über den Betriebsdampfdruck zu orientieren. Die Klemmenspannung¹⁾ einer Entladungsröhre setzt sich zusammen aus Kathodenfall, Spannungsabfall in der positiven Säule und Spannungsabfall vor der Anode. Bei langgestreckten Entladungsröhren mit glühenden Oxydelektroden kann der Gradient mit praktisch meist ausreichender Genauigkeit ermittelt werden, indem man von der gemessenen Klemmenspannung 8 bis 15 Volt für den Spannungsabfall vor den Elektroden in Abzug bringt und die Differenz, die gleich dem Spannungsabfall in der positiven Säule ist, durch die Länge der Entladungsbahn dividiert [138, 142, 186].

b) Elektrische Eigenschaften von Entladungsröhren²⁾ [143, 191, 216, 291]

21. Kennlinie, Charakteristik. Um die elektrischen Eigenschaften der Gasentladungsröhren klar und übersichtlich darzustellen, soll als Beispiel eine lediglich mit Edelgas gefüllte Entladungsröhre betrachtet werden. Es sei angenommen, daß eine langgestreckte Röhre mit Gleichstrom betrieben wird und an ihren Enden mit einer Anode sowie mit einer festen Glühkathode ausgestattet ist, die die zum Betrieb der Entladung erforderlichen Elektronen zu liefern imstande ist. Die Röhre soll mit einer Spannungsquelle betrieben werden, deren Spannung mindestens so hoch ist, daß die Entladung einsetzt. Es ist dabei erforderlich, daß zwischen Spannungsquelle und Röhre ein den Entladungsstrom begrenzender Widerstand eingeschaltet ist. Die Schaltung ist in Abb. 5 dargestellt, in der als Spannungsquelle eine Batterie N dient. Der Widerstand ist mit R und die Entladungsröhre mit B bezeichnet. Der Entladungsstrom wird mit dem Amperemeter A gemessen, die Spannung an der Entladungsröhre mit dem Voltmeter V_B , die am Widerstand mit dem Voltmeter V_R und die an der Spannungsquelle mit dem Voltmeter U . Bei gegebener Spannung der Batterie und gegebenem Widerstand beobachtet man einen bestimmten Entladungsstrom I und eine bestimmte Spannung V_B an der Entladungsröhre, die Klemmenspannung³⁾. Diese beiden Größen I und V_B können durch Veränderung des Wider-

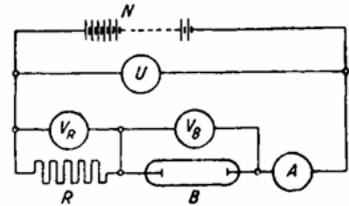


Abb. 5. Prinzipschaltbild einer Entladungsröhre. B Entladungsröhre, R Stabilisierungswiderstand, N Spannungsquelle, A Amperemeter, V_B bzw. V_R Voltmeter zur Messung der Klemmenspannung an der Entladungsröhre bzw. am Widerstand, U Voltmeter zur Messung der Netzspannung.

¹⁾ Vgl. 21.

²⁾ Die folgenden Betrachtungen gelten im wesentlichen auch für Bogenlampen mit abbrennenden Elektroden.

³⁾ Die Bezeichnung Brennspannung, die vielfach gleichlautend mit Klemmenspannung verwendet wird, soll für eine besondere Größe der Wechselstromentladung vorbehalten bleiben (vgl. 25 u. 26).

standes beeinflußt werden. Man beobachtet, daß bei Verkleinerung des Widerstandes die Stromstärke zunimmt, und daß gleichzeitig die Klemmenspannung der Entladungsröhre abnimmt, während die Spannung am Widerstand zunimmt, denn die Summe der beiden Teilspannungen ($V_B + V_R$) muß (bei Gleichspannung) stets gleich der Spannung (U) der Spannungsquelle sein.

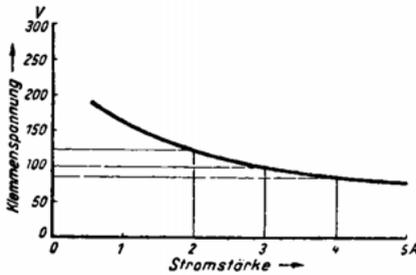


Abb. 6. Stromspannungskennlinie einer Gleichstromentladung.

Mißt man die zu den verschiedenen Werten der Stromstärke gehörigen Klemmenspannungen und trägt die Spannungswerte in Abhängigkeit von der Stromstärke graphisch auf, so erhält man die in Abb. 6 schematisch dargestellte Kurve, die man als Kennlinie oder Charakteristik bezeichnet, da sie für die betreffende Entladungsröhre charakteristisch ist. Im vorliegenden Falle ist die Kennlinie fallend bzw. negativ¹⁾, weil mit steigendem Strom die Klemmenspannung abnimmt.

Alle Gasentladungsröhren, auf die später eingegangen wird, besitzen eine fallende Kennlinie (mit Ausnahme der Hg- und Edelgashöchstdruckentladungen, vgl. 45 und 57) und müssen daher mit einem strombegrenzenden Vorschaltwiderstand betrieben werden. Man sieht dies aus folgender Überlegung: Verringert man nämlich den Vorschaltwiderstand einer solchen Gasentladung schrittweise, bis er ausgeschaltet ist, so steigt die Stromstärke mehr und mehr bis zu einem außerordentlich hohen Wert an, der von der Größe des noch vorhandenen inneren Widerstandes der Spannungsquelle und des Widerstandes der Zuleitungen abhängt. Dieser Strom ist meist so groß, daß er zur Zerstörung der Röhre führt. Es ist ein Trugschluß, anzunehmen, man könne eine Gasentladungsröhre, die beispielsweise eine Klemmenspannung von 120 Volt hat, ohne einen Vorschaltwiderstand an einer Spannungsquelle von ebenfalls 120 Volt betreiben. Wegen der fallenden Kennlinie treten nämlich labile Zustände ein. Jede zufällige kleine Erhöhung der Stromstärke bewirkt ein Steigen der Leitfähigkeit in der Gasentladung und damit eine weitere Steigerung der Stromstärke, mit der ein erneutes Steigen der Leitfähigkeit verbunden ist, so daß die Stromstärke, soweit die sonst im Stromkreis vorhandenen Widerstände es zulassen, weiter und weiter ansteigt. Nur unter besonderen Bedingungen, z. B. bei hoher spezifischer Belastung, kann die Kennlinie positiv werden.

22. Stabilitätsbedingungen. Ist von einer Gasentladungsröhre die Kennlinie bekannt, und hat man festgelegt, mit welchen elektrischen Betriebsdaten man sie betreiben möchte, so ist es möglich, die in Frage kommenden Werte der Netzspannung und des Vorschaltwiderstandes auf graphischem Wege zu ermitteln. Der durch Klemmenspannung und Entladungsstrom gegebene Arbeitspunkt muß einerseits auf der Kennlinie liegen, andererseits auf der sog. Widerstandsgeraden. Diese Widerstandsgerade gibt an, welche Klemmenspannung bei verschiedenen Stromstärken zur Verfügung steht. Man erhält die Widerstandsgerade, wenn man den der Netzspannung zugeordneten Punkt mit dem dem Kurzschlußstrom entsprechenden Punkt verbindet. Wird nämlich der Anordnung, bestehend aus Spannungsquelle und Vorschaltwiderstand, ein großer Strom entnommen, dann tritt ein großer Spannungsabfall am Vorschaltwiderstand auf, so daß die zum Betrieb der Gasentladung zur Verfügung stehende Klemmenspannung niedrig ist, während umgekehrt bei kleiner Stromentnahme sich eine größere Klemmenspannung ergibt, die für den Grenzfall einer unendlich kleinen Stromstärke gleich der Netzspannung ist. In der Darstellung der Abb. 7 schneidet daher die Widerstandsgerade 3 die Ordinatenachse in einem Wert, der der Netzspannung entspricht. Der Verlauf der Widerstandsgeraden im einzelnen ist durch die Gleichung

$$(2) \quad V_B = U - I \cdot R$$

¹⁾ Ein elektrisches Gerät mit steigender, bzw. positiver Kennlinie ist z. B. ein Ohmscher Widerstand oder eine Glühlampe, an denen mit steigendem Strom die Spannung ansteigt.

gegeben, in der U die Netzspannung, V_B die für die Gasentladung zur Verfügung stehende Klemmenspannung, I die Stromstärke und R die Größe des Vorschaltwiderstandes ist. Man sieht aus der Gleichung, daß V_B gleich Null wird, wenn $U = I_K \cdot R$. Diese Stromstärke I_K nennt man den Kurzschlußstrom. Er stellt den größtmöglichen Wert der Stromstärke dar, der der Anordnung entnommen werden kann. In der Abb. 7 ergibt er sich als der Schnittpunkt der Widerstandsgeraden 3 mit der Abszissenachse. Die Größe des Vorschaltwiderstandes kann der Darstellung der Abb. 7 als Quotient Netzspannung/Kurzschlußstrom entnommen werden. Je kleiner der Vorschaltwiderstand ist, um so flacher verläuft bei gleichem Maßstab die Widerstandsgerade.

Durch den oben erwähnten Arbeitspunkt läßt sich nun eine Schar von Widerstandsgeraden zeichnen, die verschiedenen Widerständen und Netzspannungen entsprechen. Für einen stabilen Betrieb ist Voraussetzung, daß die Widerstandsgerade am Arbeitspunkt steiler verläuft als die Kennlinie der Gasentladung. In diesem Fall wird bei einer zufälligen Zunahme des Stromes die für die Entladungsstrecke zur Verfügung stehende Spannung verringert, so daß die Stromzunahme rückgängig gemacht wird. Wenn dagegen die Widerstandsgerade flacher als die Kennlinie ist, tritt diese selbsttätige Kompensation nicht auf, so daß es nicht zur Stabilisierung der Entladung kommt. Die gestrichelte Gerade scheidet also von vornherein aus. Die verbleibenden Widerstandsgeraden besagen, daß der Betriebspunkt entweder mit hoher Netzspannung und großem Vorschaltwiderstand (Gerade 1) oder aber mit niedrigerer Netzspannung und kleinerem Vorschaltwiderstand (Gerade 3) oder auch mit Zwischenwerten (Gerade 2) erreicht werden kann. Erfahrungsgemäß muß die Netzspannung im allgemeinen mindestens das 1,3fache der Klemmenspannung betragen.

Vielfach ist es von Wichtigkeit, festzustellen, wie sich bei gegebenem Vorschaltwiderstand und gegebener Kennlinie eine Änderung der Netzspannung auf die Betriebsdaten auswirkt. Die Widerstandsgerade behält die Neigung bei und verschiebt sich parallel (Gerade 4), so daß sie nunmehr durch den der neuen Netzspannung entsprechenden Punkt der Ordinatenachse geht und die Kennlinie entweder schneidet oder nicht schneidet. In dem letzteren Fall muß die Entladung erlöschen. In dem andern Fall stellen sich die durch den neuen Schnittpunkt der Widerstandsgeraden mit der Kennlinie gegebenen Betriebsdaten ein. Aus dem dargestellten Beispiel ergibt sich, daß die Erhöhung der Netzspannung um etwa 10 v. H. eine Zunahme des Stromes um etwa 18 v. H. und eine Abnahme der Klemmenspannung um etwa 16 v. H. zur Folge hat. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß die Verhältnisse von Fall zu Fall verschieden liegen und im einzelnen an Hand der Kennlinien diskutiert werden müssen.

23. Verluste im Vorschaltwiderstand. Der Vorschaltwiderstand ist also zum Betrieb der Entladungsröhren unentbehrlich. Man muß dabei mit in Kauf nehmen, daß ein beträchtlicher Teil der dem Netz entnommenen Leistung im Vorschaltwiderstand meist nutzlos in Wärme umgesetzt wird. Da die Leistung eines Stromverbrauchers bei Gleichstrom gleich dem Produkt aus Stromstärke und Spannungsabfall am Verbraucher ist, verteilt sich die dem Netz entnommene Leistung proportional den Spannungsabfällen auf Vorschaltwiderstand und Entladungsröhre. Wenn, wie es oft der Fall ist, die Klemmenspannung gleich der halben Netzspannung ist, dann geht etwa die halbe Leistung im Vorschaltgerät verloren.

24. Wechselstrom. Bei den obigen Ausführungen wurde Betrieb mit Gleichstrom vorausgesetzt, weil dabei die Verhältnisse am leichtesten zu überschauen sind. Ungleich wichtiger als Gleichstrom ist aber heute Wechselstrom, für den das oben Gesagte in großen Zügen ebenfalls Gültigkeit behält.

Zur Erleichterung des Verständnisses müssen zunächst einige grundsätzliche Betrachtungen über Wechselstrom vorausgeschickt werden.

Bei einem Netz, das die übliche 50periodige Wechselspannung liefert, durchläuft die Spannung die in Abb. 8 a in Kurve U_N dargestellten Werte der Spannung 50mal in der Sekunde. Schaltet man an ein solches Netz einen Verbraucher mit Ohmschem Widerstand, so ist der Strom in jedem Augenblick proportional der in diesem Augenblick vorhandenen Spannung.

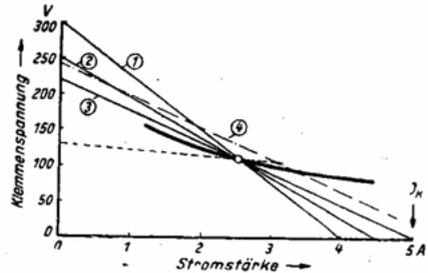


Abb. 7. Widerstandsgeraden u. Stromspannungskennlinie einer Gleichstromentladung.

Die Stromkurve ist daher in Abb. 8a der Spannungskurve ähnlich. Kennzeichnend für den Ohmschen Widerstand ist die Tatsache, daß Strom und Spannung jeweils gleichzeitig Null sind und zu jeweils denselben Augenblicken ihre Maximalwerte im selben Sinn erreichen. Strom und Spannung haben gleiche Phase.

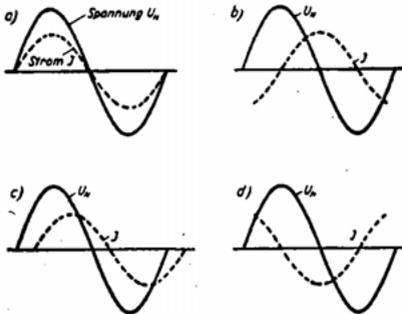


Abb. 8. Zeitlicher Verlauf von Spannung und Stromstärke an verschiedenen Wechselstromwiderständen. a) Ohmscher Widerstand, b) Selbstinduktion, c) Selbstinduktion mit Ohmschen Widerstand und d) Kondensator.

Bei Wechselstrom gibt es aber außer dem Ohmschen Widerstand auch andere Widerstandsarten: Induktivitäten und Kapazitäten. Bei den ersteren, die z. B. durch eine Drosselspule verkörpert werden, ist der durch die Drossel fließende Strom nicht der in jedem Augenblick vorhandenen Spannung proportional, sondern hinkt hinter der Spannung nach, und zwar um $\frac{1}{4}$ Periode (Abb. 8b). Hat die Selbstinduktion außerdem noch einen Ohmschen Widerstand, wie es praktisch bei den Drosseln stets der Fall ist, so liegt die Phasenverschiebung zwischen den für rein Ohmschen und rein induktiven Widerstand liegenden Werten (Abb. 8c). Eine entgegengesetzte Phasenverschiebung zeigt der Kondensator (Abb. 8d), bei dem der durch ihn fließende Strom der Spannung um $\frac{1}{4}$ Periode voreilt.

Da die Wechselstromgrößen der Stromstärke und der Spannung periodisch schwanken, kennzeichnet man sie durch einen zeitlichen Mittelwert. Diesen kann man auf verschiedene Weise bilden. Man spricht vom Effektivwert, wenn die Mittelung so vorgenommen wird, daß die Wärmewirkung des Stromes zugrunde gelegt wird. Dieser Wert, der auch quadratischer Mittelwert heißt, wird von den meisten

technischen Meßinstrumenten angezeigt. Bei wechselstrombetriebenen Gasentladungen gibt man Strom und Spannung vorzugsweise in Effektivwerten an¹⁾.

Bei Gleichstrom ist die Leistungsaufnahme eines Stromverbrauchers unmittelbar gleich dem Produkt aus Stromstärke und Klemmenspannung. Bei Wechselstrom gilt dies nur für jeden einzelnen Zeitpunkt, so daß man, um die Leistungsaufnahme zu bekommen, über den Verlauf einer Periode mitteln muß. Diese Mittelung nimmt das Wattmeter vor. Wenn über die ganze Periode stets der Strom der an den Klemmen des Verbrauchers liegenden Spannung proportional ist, z. B. bei der Glühlampe, ist auch bei Wechselstrom die Leistungsaufnahme gleich dem Produkt aus Stromstärke und Spannung (in Effektivwerten).

Tritt dagegen im Verbraucher eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf — sei es, daß er eine Selbstinduktion, Kapazität oder eine Gasentladungsstrecke enthält — so ist das Produkt aus Effektivwert der Stromstärke I und Effektivwert der Spannung V , Scheinleistung (in Voltamp. gemessen) genannt, größer als die Leistungsaufnahme L , die sog. Wirkleistung. Das Verhältnis Wirkleistung zu Scheinleistung nennt man Leistungsfaktor, $\cos \varphi$. Es gilt also $\cos \varphi = L/I \cdot V$. Im Rahmen dieser Betrachtungen genügt es, den Leistungsfaktor als reine Rechengröße zu behandeln, obwohl diese Größe bei Kapazitäten und Induktivitäten eine physikalische Bedeutung hat und die Phasenverschiebung bezeichnet. Bei Gasentladungsröhren bezeichnet man die Größe $\cos \varphi$ besser als Verzerrungsfaktor; vgl. auch 27.

Beispiel: Gegeben Hg-Hochdrucklampe mit der Klemmenspannung $V = 135$ V und Stromstärke $I = 2,32$ A. Die Brennerleistung sei 240 W. Die Scheinleistung ist $V \cdot I = 135 \cdot 2,32 = 313$ VA und der Verzerrungsfaktor $\cos \varphi = 240/313 = 0,77$.

25. Wechselstromentladung. Betreibt man eine Gasentladung an Wechselstrom, so ergeben sich aus der Zusammenwirkung der Gasentladungseigenschaften und der in 24 behandelten allgemeinen Eigenschaften des Wechselstromes wichtige Abweichungen gegenüber der Gleichstromentladung, die wegen der technischen Bedeutung des Wechselstrombetriebes ausführlich zu behandeln sind.

¹⁾ Hitzdraht-, Weicheisen-, dynamometrische und elektrostatische Instrumente zeigen unmittelbar den Effektivwert an. Die neuerdings häufiger verwendeten Drehspulinstrumente mit vorgeschaltetem Gleichrichter sind bei Gasentladungen mit Vorsicht zu gebrauchen, da ihre Eichung nur bei unverzerrten, sinusförmigen Strom- und Spannungswerten zutrifft, nicht aber bei verzerrten, wie z. B. Klemmenspannung V_B in Abb. 9b [145, 148].

Je nachdem, ob man als Vorschaltgerät einen Ohmschen Widerstand, eine Drossel oder einen Kondensator verwendet, ergeben sich die in Abb. 9a—c wiedergegebenen Kurven für den Verlauf der Netzspannung U_N , Klemmenspannung V_B und Brennerstrom I , und zwar bringen wir den Fall einer Hg-Hochdruckröhre, die nacheinander mit den verschiedenen Vorschaltgeräten betrieben wurde, wobei stets auf gleiche Belastung eingestellt wurde. Der Effektivwert der Netzspannung U_N ist 220 Volt. Aus dem Verlauf von U_N geht hervor, daß der Scheitelwert beträchtlich höher liegt, nämlich bei 310 V. Dies ist günstig in bezug auf die Erstzündung bei der Inbetriebnahme der Entladungsröhre. Da der Strom in der Entladungsröhre an einem 50-Perioden-Netz 100mal in der Sekunde seine Richtung ändert und daher die Entladung in jeder Halbperiode erlischt, wie aus Abb 9 hervorgeht, so muß sie zu Beginn jeder Halbperiode wieder gezündet werden. Diese Wiederzündungen erfolgen für die verschiedenen Vorschaltgeräte in verschiedener Weise. Am einfachsten sind die Verhältnisse bei einem Ohmschen Vorschaltwiderstand zu überblicken, da dann Strom und Spannung in Phase sind. Bis zum Eintritt der Wiederzündung verläuft die Klemmenspannung V_B an der Röhre übereinstimmend mit der Netzspannungskurve U_N (Abb. 9a). Nach der Zündung fällt die Spannung außerordentlich rasch auf die Brennspannung ab, die bis zum Erlöschen der Röhre angenähert konstant bleibt. Nach dem Erlöschen folgt die Spannungskurve wiederum der Netzspannung. Die Brennspannung liegt unterhalb desjenigen Wertes, den man mit einem Effektivwert angezeigenden Voltmeter als Klemmenspannung mißt, da mit diesem über die Halbperiode gemittelt wird und insbesondere die Zündspitze mitgemessen wird. Bei der Wechselstromentladung ist scharf zwischen der Klemmen- und Brennspannung zu unterscheiden, während bei der Gleichstromentladung beide Ausdrücke dasselbe bedeuten. Den Verlauf des Stromes in der Röhre zeigt die Kurve I . Man sieht, daß der Strom bis zum Eintritt der Zündung Null ist, dann rasch zu einem Maximum ansteigt, anschließend wieder abnimmt. Vom Erlöschen der Entladung bis zur Zündung in der nächsten Halbperiode ist der Strom wieder Null. In den Zeiten, in denen der Strom Null ist, wird nur die bei der Rekombination auftretende meist sehr schwache Strahlung ausgesandt. Bei Verwendung einer Drossel (Abb. 9b) liegen die Verhältnisse deshalb anders, weil der Strom gegenüber der Netzspannung nachhinkt. Das hat zur Folge, daß im Augenblick des Stromnulldurchgangs die Klemmenspannung an der Entladungsröhre verhältnismäßig schnell ansteigt, und daher die Wiederzündung unter Verkürzung der Dunkelpause früher erfolgt als bei Ohmschem Vorschaltwiderstand. Wegen der in der Dunkelpause allmählich fortschreitenden Entionisierung der Entladungsstrecke erfolgt die Wiederzündung bei um so niedrige-

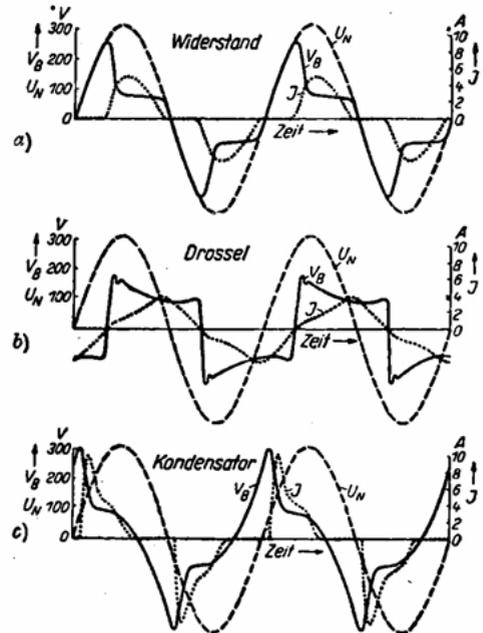


Abb. 9. Zeitlicher Verlauf der Netzspannung (U_N), der Klemmenspannung (V_B) und der Stromstärke (I) einer mit Wechselstrom von 50 Hz betriebenen Hochdrucklampe (S 300). Bei a) diente ein Ohmscher Widerstand, bei b) eine Drossel, bei c) ein Kondensator als Stabilisierungswiderstand.

Bei Verwendung einer Drossel (Abb. 9b) liegen die Verhältnisse deshalb anders, weil der Strom gegenüber der Netzspannung nachhinkt. Das hat zur Folge, daß im Augenblick des Stromnulldurchgangs die Klemmenspannung an der Entladungsröhre verhältnismäßig schnell ansteigt, und daher die Wiederzündung unter Verkürzung der Dunkelpause früher erfolgt als bei Ohmschem Vorschaltwiderstand. Wegen der in der Dunkelpause allmählich fortschreitenden Entionisierung der Entladungsstrecke erfolgt die Wiederzündung bei um so niedrige-

rer Spannung, je kürzer die Dunkelpause ist. Aus diesen Gründen zeigt eine mit Drossel betriebene Entladungsröhre ein geringeres Flackern und eine größere Stabilität als beim Betrieb mit Ohmschem Widerstand. Abb. 9c zeigt die Verhältnisse bei einem Kondensator als Vorschaltwiderstand. Da in diesem Fall der Strom bereits den Wert Null durchläuft, bevor die Netzspannung das Vorzeichen wechselt, so ist die Dunkelpause besonders lang, die Wiederspitzspannung also besonders groß. Dies bedingt einerseits, daß der Entladungsstrom nur während eines kleinen Teiles der Halbperiode fließt, während andererseits der Momentanwert (und auch der Effektivwert) des Entladungsstromes hohe Werte annimmt. Daher ist sowohl das Flackern stark und die Stabilität der Entladung gering als auch die Strahlungsausbeute hoch [130, 282, 283].

26. Klemmenspannung und ihre Messung. Die Wiederspitzspannung beeinflusst den mit einem Voltmeter gemessenen Wert der Klemmenspannung. Bei Wechselspannung ist die Brennspannung, die sich in jeder Halbperiode nach erfolgter Wiederspitzspannung der Entladungsröhre einstellt, in erster Annäherung identisch mit derjenigen Spannung, die man beim Anschluß des gleichen Brenners an Gleichstrom messen würde. Mit dem Voltmeter mißt man aber nicht diese Brennspannung, sondern einen Mittelwert über die Halbperiode, der auch die Zündspitze zu Beginn der Halbperiode mit erfaßt. Infolgedessen ist die Klemmenspannung eines wechselstrombetriebenen Brenners größer als die des gleichen Brenners bei gleicher Leistungsaufnahme an Gleichstrom und ist außerdem abhängig von der Art des Vorschaltgerätes. Zur Erläuterung mag folgendes Beispiel dienen, aus dem man entnehmen kann, mit welchen Unterschieden man zu rechnen hat. Betreibt man einen bei Gleichstrom mit 120 V Klemmenspannung brennenden Hg-Hochdruckbrenner bei Wechselstrom (Netzspannung 220 V) einmal mit Drossel und dann mit Ohmschem Widerstand und schließlich mit Kondensator, so mißt man im ersten Fall eine Klemmenspannung von 130 V, im zweiten Fall von etwa 140 bis 150 V und im dritten Fall von 180 bis 200 V.

Außerdem hängt die Höhe der Klemmenspannung von der Höhe der Netzspannung ab, und zwar dadurch, daß eine Erhöhung der Netzspannung die Wiederspitzspannung herabsetzt. Der Einfluß der Wiederspitzspannung auf die Brennspannung zeigt sich z. B. darin, daß man gewisse Unterschiede in der Kennlinie erhält, je nachdem man bei Wechselstrom die Kennlinie bei konstanter Netzspannung durch Veränderung des Wertes des Vorschaltwiderstandes aufnimmt, oder bei konstantem Vorschaltwiderstand durch Veränderung der Netzspannung. Bei Gleichstrom ist ein derartiger Einfluß nicht vorhanden.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß die Messung der Klemmenspannung einer Röhre mit einem stromverbrauchenden Instrument bei Wechselstrom auf die Betriebsdaten der Röhre zurückwirkt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß infolge des Stromverbrauches des Voltmeters die Klemmenspannung an der Entladungsröhre während der Dunkelpausen gesenkt wird, wodurch die Wiederspitzspannung erst zu einem späteren Zeitpunkt und bei einer höheren Spannung erfolgt. Wenn der Widerstand des Voltmeters zu niedrig ist, kann sich dies so stark auswirken, daß die Entladung erlischt. Man muß daher darauf achten, daß das Voltmeter oder der Spannungspfad eines Wattmeters einen genügend hohen inneren Widerstand (größer als 20 Ohm/V) besitzt. Die Verwendung eines Drehspulinstrumentes in Verbindung mit einem Gleichrichter ist bedenklich; vgl. 24 [145, 148, 261].

27. Leistungsmessung. Verzerrungsfaktor. Da der Verzerrungsfaktor — siehe 24 — selbst bei ein und derselben Entladungsröhre nicht konstant ist — er hängt u. a. von dem Vorschaltgerät ab — kann man die Leistungsaufnahme einer Entladungsröhre nur unmittelbar mit dem Wattmeter und nicht aus Strom und Spannung ermitteln. Jedoch genügt oft zur Kennzeichnung des Betriebszustandes einer Ent-

ladungsröhre die Angabe von Stromstärke und Klemmenspannung, zumal wenn es sich um serienmäßige Lampen mit dem dazugehörigen Vorschaltwiderstand handelt.

In allen Fällen, in denen die Wirtschaftlichkeit eine Rolle spielt, interessieren außerdem Angaben über die dem Netz entnommene Leistung, die gleichfalls nur mit einem Wattmeter gemessen werden kann; denn auch das Produkt aus Stromstärke und Netzspannung ist größer als die dem Netz entnommene Leistung. Während sich der Verzerrungsfaktor der Entladungsröhre zwischen 0,7 und 1,0 bewegt, hängt der Leistungsfaktor von Röhre einschl. Vorschaltgerät sehr stark von dem letzteren ab und bewegt sich zwischen 0,2 und 1,0.

28. Stabilität bei verschiedenen Vorschaltgeräten. Die bei den verschiedenen Vorschaltwiderständen verschiedene Wiederezündspannung wirkt sich ferner auf die Stabilität der Entladungsröhre aus. Die Entladung erlischt nämlich bei Wechselstrom bei Klemmenspannungen, bei denen sie bei Gleichstrom noch völlig stabil brennen würde. In dem oben gebrachten Beispiel wird bei Wechselstrombetrieb die an Ohmschem Widerstand und erst recht die an Kondensator betriebene Entladungsröhre bereits bei der kleinsten Netzspannungserniedrigung erlöschen, während die an Drossel betriebene Entladungsröhre bis zu Netzspannungen von vielleicht 190 V herab betrieben werden kann. An Gleichstrom dagegen wäre ein Betrieb dieses Brenners mit noch kleineren Netzspannungen möglich [282, 283, 284, 285].

29. Vorschaltgeräte, insbes. Drossel. Außer der günstigen Auswirkung auf die Stabilität zeigt die Drossel noch weitere Vorteile, die ihr als Vorschaltwiderstand bei Wechselstrom eine Sonderstellung geschaffen haben. Ein Hauptvorteil der Drossel ist darin zu sehen, daß ihre Eigenverluste gering sind, so daß nur 10 bis 20 v. H. der dem Netz entnommenen Leistung in der Drossel verbraucht werden, der weitaus größte Teil jedoch in der Entladungsröhre selbst umgesetzt wird, während in einem Ohmschen Vorschaltwiderstand 30 bis 50 v. H. der gesamten, dem Netz entnommenen Leistung verbraucht wird.

Eine übliche Ausführungsform ist in Abb. 10 schematisch dargestellt. Sie besteht im allgemeinen aus einem bis auf einen „Luftspalt“ L geschlossenen Eisenkern E , der zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten aus aufeinandergeschichteten Blechen zusammengesetzt ist, und einer aus vielen Drahtwindungen gebildeten Spule S . Der die Drosselspule durchfließende Strom erzeugt im Eisenkern ein periodisch schwankendes Feld, das seinerseits in den Windungen der Spule eine elektrische Gegenspannung hervorruft. Der Wechselstromwiderstand einer Drossel hängt bei gegebener Frequenz vor allem von dem Eisenquerschnitt, der Windungszahl und dem Luftspalt ab. Während bei Gleichstrom die Summe der Spannungsabfälle an Vorwiderstand und Entladungsröhre gleich der Netzspannung ist, ist bei Wechselstrom diese Summe größer als die Netzspannung. Diese Eigenart rührt von der durch die Drossel bewirkten Phasenverschiebung her.

In allen den Fällen, in denen die Brennspannung sehr von der Netzspannung abweicht, sei es, daß sie viel größer oder viel kleiner ist, schaltet man einen Transformator zwischen Netz und Röhre. Der Transformator kann dabei so gebaut sein, daß seine Sekundärspannung mit zunehmendem Sekundärstrom stark abnimmt, so daß die Verwendung einer Drossel überflüssig wird. Einen solchen Transformator nennt man Streufeldtransformator.

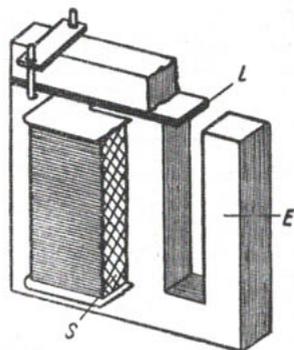


Abb. 10. Schemabild einer Drossel (für Hg-Hochdrucklampen S 300 bzw. S 500) mit Eisenkern E , Spule S und Luftspalt L .

Bisher wenig angewendet, aber vielleicht in der Zukunft von größerem Interesse ist die Verwendung von Kondensatoren als Vorschaltwiderstände, die in Verbindung mit Hochdrucklampen in 55 näher behandelt ist.

30. Zündhilfe. Die Wiederzündung zu Beginn jeder Halbperiode erfolgt bei einer verhältnismäßig niedrigen Spannung, da von der vorhergehenden Halbperiode her noch Ladungsträger in größerer Zahl in der Gasstrecke vorhanden sind. Bei der Erstzündung dagegen müssen die die Entladung tragenden Ladungsträger erst geschaffen werden, wobei der Zündvorgang, wie in 19 beschrieben, über die Stadien der stillen Vorentladung und Glimmentladung zur Bogenentladung führt.

Um das Anspringen der zum Zünden des Bogens führenden Glimmentladung mit Sicherheit zu gewährleisten, gibt es einige einfache Hilfsmittel, die schematisch in

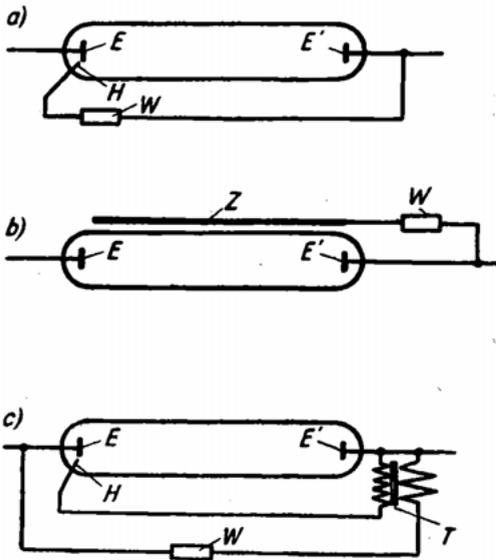


Abb. 11. Zündhilfen bei Entladungsröhren. a) Innere Hilfs Elektrode H , b) äußerer Zündbelag Z und c) Hochspannungstransformator T mit Hilfs Elektrode H . W ist in allen Fällen ein Schutzwiderstand.

ist darin zu sehen, daß sie eine besondere Einschmelzung benötigt, die besonders bei Entladungsröhren aus Quarzglas eine Erschwerung bedeutet. Diesen Nachteil vermeidet der sogenannte Zündstreifen (Abb. 11 b), der aus einem auf der Gefäßwandung angebrachten leitfähigen Belag Z , z. B. aus Gold, besteht. Der Zündstreifen ist gleichfalls mit der einen Hauptelektrode E' verbunden und reicht bis in die Nähe der anderen Hauptelektrode E , so daß zwischen dieser Elektrode und dem Zündstreifen ein kapazitiver Strom fließt. In dieser Hinsicht ist der Zündstreifen als äußere Hilfs elektrode anzusehen. Dazu kommt jedoch, daß er außerdem auf der Gefäßwandung vorhandene Restladungen, die die Ausbildung einer Entladung verhindern können, beseitigt. Der Schutzwiderstand W hat etwa 0,4 bis 5 $M\Omega$.

Unter Umständen genügt die vorhandene Netzspannung nicht — namentlich bei Gleichspannung —, um in Verbindung mit den oben genannten Zündverfahren eine Zündung zu bewirken. In diesen Fällen wird die Wirkung gesteigert, indem man nach Abb. 11 c an die innere oder äußere Hilfs elektrode eine erhöhte Spannung von bis zu

Abb. 11 dargestellt sind. Ein sehr wirkungsvolles Mittel (Abb. 11 a) besteht in der Anbringung einer Hilfs elektrode H , die in der Nähe der einen Hauptelektrode E angeordnet und mit der anderen Hauptelektrode E' über einen Widerstand W von einigen 1000 Ohm verbunden ist. Man verkürzt also die Länge der Gasstrecke, die bei der Zündung zu überbrücken ist. Dadurch wird erreicht, daß beim Anlegen der Netzspannung zwischen der Hilfs elektrode H und der benachbarten Hauptelektrode E eine Glimmentladung entsteht, die sowohl Ladungsträger erzeugt, welche die Zündung der Hauptentladung erleichtern, als auch die Hauptelektrode stellenweise vorheizt. Die Hilfs elektrode besteht meist aus einem kleinen Stift, der der Elektrode zugekehrt ist. Bei Gleichspannung ist diese Zündhilfe im allgemeinen nur dann wirksam, wenn sich die Hilfs elektrode in der Nähe der Kathode befindet, so daß die Zündung u. U. erst nach Umpolen der Lampe eintritt. Ein Nachteil der Hilfs elektrode

1000 Volt legt. Bei Wechselstrom genügt ein kleiner Hochspannungstransformator *T*. Auch bei Gleichstrom kann man einen Transformator verwenden, indem man dessen Primärstrom kurzzeitig ein- und ausschaltet und den beim Ausschalten entstehenden Spannungsstoß der Hilfselektrode zuführt.

Man kann auch von Hilfelektroden gänzlich absehen, wenn man den Hauptelektroden selbst eine erhöhte Spannung kurzzeitig zuführt. Dies kann in der Weise geschehen, daß man einen Kondensator parallel zu den Elektrodenzuführungen legt. In Verbindung mit der als Vorschaltwiderstand dienenden Drossel entstehen beim Einschalten der Lampe hohe Spannungsspitzen, die die Netzspannung übersteigen. Einen ganz anderen Weg benutzt man, wenn man die in einem kleinen Tesla- oder Hochfrequenzapparat erzeugte Funkenentladung zum Leuchtrohr des Brenners, zur Brennerhalterung oder zu einer Stromzuführung übergehen läßt.

c) Quecksilber-Entladung

Die Hg-Entladung ist die wichtigste unter den Gasentladungen, die für die Erzeugung der UV-Strahlen Bedeutung besitzen, da keine andere so viele und so intensive Linien im gesamten UV aufweist wie gerade die Hg-Entladung. Dazu kommt, daß das Hg schon bei niedrigen Temperaturen einen erheblichen Dampfdruck besitzt und weitgehend chemisch indifferent ist, so daß es weder die Gefäßwandung noch die Elektroden angreift.

31. Allgemeines über Niederdruck- und Hochdruckentladung. Je nach dem Dampfdruck des Hg unterscheidet man zwei verschiedene Entladungsformen: die Niederdruckentladung mit einem Dampfdruck zwischen 0,01 und 1 Torr und die Hochdruckentladung mit einem Dampfdruck über etwa 100 Torr¹⁾ bis zu einigen 100 at.

Innerhalb des Hochdruckgebietes bezeichnet man Entladungen bei Dampfdrücken über etwa 30 at als Höchstdruck- oder Superhochdruck-Entladungen. Diese Bezeichnung sollte aber auf dieses Druckgebiet beschränkt bleiben, da erst bei ihm gewisse zusätzliche Erscheinungen im Spektrum (nicht aber in den Entladungserscheinungen) auftreten, die eine besondere Bezeichnung rechtfertigen, Näheres siehe 57.

Bei der Niederdruckentladung füllt die leuchtende Säule gleichmäßig den Rohrquerschnitt aus. Die Stromdichte ist gering. Der Gradient und die Klemmenspannung sind niedrig. Der Gradient hat Werte zwischen 0,5 und 2 Volt/cm. Leuchtdichte und Lichtausbeute sind klein, die Leuchtfarbe bläulich. Im UV überwiegt die Resonanzlinie 254 m μ , da wegen des niedrigen Druckes und der geringen Stromdichte die Anregungsbedingungen für diese Linie günstig sind.

Bei der Hochdruckentladung fällt vor allem die Einschnürung der leuchtenden Säule zu einem leuchtenden Faden hoher Leuchtdichte auf. Der Gradient und die Klemmspannung sind beträchtlich höher als bei Niederdruck. Der Gradient liegt im allgemeinen oberhalb von 5 Volt/cm. Die Leuchtfarbe ist gelblicher. Im UV hat die Linie 254 m μ ihre beherrschende Stellung verloren, während zahlreiche andere Linien im UV sehr stark geworden sind.

Solange ein Überschuß an flüssigem Hg im Entladungsrohr vorhanden ist, wird der Dampfdruck durch die Temperatur der kältesten Stelle im Innern der Röhre be-

¹⁾ Das Übergangsbereich von 10 bis 100 Torr steht zwischen Nieder- und Hochdruck und kann keinem von beiden zugeordnet werden.