

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. Rajewsky
Direktor des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Biophysik, Frankfurt a. M.

Mit 217 Abbildungen und 40 Tabellen

BERLIN 1942

VERLAG WALTER DE GRUYTER & CO

vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung — J. Guttentag, Verlags-
buchhandlung — Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp.

Archiv-Nr. 527342

Alle Rechte, insbesondere das Übersetzungsrecht, von der Verlagshandlung vorbehalten · Copyright
1942 by Walter de Gruyter & Co., Berlin · Printed in Germany · Druck von Walter de Gruyter & Co.,

Berlin W 35

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 über 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 besonders 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, das 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.

Frankfurt a. M., 10. November 1941

B. Rajewsky

Vorwort

Wohl selten gehört auf einem 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 Vorhaben 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 dem 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 Quecksilberhochdruckentladung, 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 gewidmeten Teil zu einem zuverlässigen Nachschlagewerk über alle praktisch wertvollen UV-Strahlenquellen gestaltet zu haben.

Die Meßtechnik erforderte 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 Thermolemente, 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 in 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 bekanntesten 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 stützten, wurden im allgemeinen im Text nicht genannt; sie sind aber durch kursiv gesetzte Ziffern, die im Schrifttumsverzeichnis wiederkehren, leicht aufzufinden. Dieses 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 Reichsärzterführung 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. M., durch wertvolle Ratschläge und verständnisvolle Förderung dieser Arbeit. Wir danken auch unserem Mitarbeiter, Herrn Dipl.-Ing. W. Lorz, 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

Inhaltsverzeichnis

Kapitel I

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	11
11 Möglichkeiten der UV-Erzeugung	
A. Gasentladungsstrahler	11
a) Grundsätzliches zur Gasentladung	11
12 Lichterscheinungen in der Gasentladung. 13 Entladungsträger. 14 Anregung und Trägerbildung. 15 Zündspannung. Klemmenspannung. 16 Austrittsarbeit und Kathodenfall. 17 Glühkathode. Oxydkathode. 18 Feldkathode. 19 Glimmentladung. Bogenentladung. 20 Positive Säule. Gradient	
b) Elektrische Eigenschaften von Entladungsröhren	18
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, insbes. Drossel. 30 Zündhilfe	
c) Quecksilber-Entladung	25
31 Allgemeines über Niederdruck- und Hochdruckentladung. 32 Gradient. 33 Druckabhängigkeit der Lichtausbeute. 34 Übersicht über die Größen, von denen die Strahlungsausbeute abhängt. 35 Ausbeute der Linie 254 m μ . 36 Ausbeute der Linie 366 m μ . 37 Ausbeute für verschiedene UV-Bereiche. 38 Tabellarische Zusammenstellung der Ausbeute für die einzelnen Linien. 39 Kontinuumstrahlung. 40 Eignung der Hg-Entladung als Strahlungsnormal. 41 Einfluß des Vorschaltgerätes auf die spektrale Intensitätsverteilung. 42 Schlußfolgerung	
d) Sonstige Metaldampf- oder Gasentladungen	36
43 Metaldampfentladungen. 44 Wasserstoffentladung	
e) Quecksilber-Hochdrucklampen	37
45 Einleitung. 46 Quarzlampe S 300 als typischer Vertreter einer Hg-Hochdrucklampe mit Glühelktroden. 47 Zündung. 48 Dosierung der Hg-Menge. 49 Einbrennvorgang. 50 Einfluß der Netzspannungsänderungen. 51 Spektrale Intensitätsverteilung. 52 Betrieb in waagerechter und senkrechter Brennlage. 53 Intensitätsabnahme während des Betriebes. 54 Vorschaltgeräte. 55 Glaslampe. 56 Höchstdrucklampe. 57 Hg-Hochdrucklampen mit flüssigen Elektroden	
f) Handelsübliche Entladungslampen	53
58 Lampen für allgemeine UV-Zwecke. 59 Hg-Hochdrucklampen mit Filterung. sowie Hg-Niederdrucklampen. 60 UV-Normallampe. 61 Wasserstofflampe. 62 Spektrellampen und Eisenbogenlampe	

B. Temperaturstrahler	63
63 Allgemeines. Schwarzer Körper. 64 Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers. 65 UV-Strahlung des schwarzen Körpers. 66 Strahlung von nicht-schwarzen Körpern, insbes. Wolfram. 67 Wolframglühlampen einschl. Wolframbandlampen. 68 Farbtemperatur. Schwarze Temperatur. 69 Wolframpunktlichtlampe. 70 Strahlungsquellen mit Gasentladungs- und Temperaturstrahlung	
C. Bogenlampen mit abbrennenden Elektroden und Funkenstrecken . . .	70
71 Allgemeines. 72 Elektroden. 73 Elektrische Verhältnisse. 74 Strahlung. 75 Eingeschlossener Lichtbogen. 76 Beck-Bogen. 77 Funkenstrecke	
D. Die Sonne	75
78 Extraterrestrische Strahlung der Sonne. 79 Absorption in der Erdatmosphäre. 80 Streuung in der Erdatmosphäre. Himmelsstrahlung. 81 Gesamtbestrahlungsstärke der Sonnen- und Himmelsstrahlung im UV-B. 82 Einfluß der Meereshöhe auf die Bestrahlungsstärke im UV-B. 83 Einfluß der Bewölkung. 84 UV-Klima der Großstadt. 85 Sonnen- und Himmelsstrahlung im UV-A. Zusammenfassung	

Kapitel III

Messung der UV-Strahlung	83
A. Spektrale Zerlegung	83
86 Grundlagen. 87 Monochromator-Prinzip. 88 Prismen. Dispersion. 89 Auflösung. 90 Lichtstärke. 91 Spektrale Reinheit. 92 Doppelmonochromator. 93 Handelsübliche Spektralapparate	
B. Strahlungsempfänger mit ihren elektrischen Meßgeräten	89
94 Thermoelement. 95 Galvanometer 96 Galvanometerverstärker. 97 Nichtselektivität. 98 Eichen des Thermoelements. 99 Selektive Strahlungsempfänger. 100 Prinzipschaltbild der Photozelle. 101 Vakuumzelle. 102 Gasgefüllte Zelle. Vergleich zwischen Vakuum- und gasgefüllten Zellen. 103 Messung des Photozellenstromes mit Galvanometer. 104 Elektrometeranordnungen. 105 Verstärkerröhren und ihre Anwendung. 106 Lichtzähler. 107 Mekapion. Zusammenfassung. 108 Photoelement. 109 Allgemeine Vorsichtsmaßnahmen beim Arbeiten mit Strahlungsempfängern. 110 Photographische Platte	
C. Allgemeines über Arbeiten mit Spektralapparaten	111
111 Aufstellung und Justierung der Spektralapparate. 112 Einstellung des Spaltes. 113 Aufstellung der Strahlenquelle. 114 Anordnung des Strahlungsempfängers. 115 Strahlungsschwächungsmittel	
D. Allgemeine Eigenschaften der Filter und ihre Handhabung	118
116 Allgemeines. 117 Durchlässigkeit. Durchlassungsvermögen. 118 Filterkombination. 119 Einfluß der Schichtdicke auf das Durchlassungsvermögen. 120 Lambert-Beersches Gesetz. 121 Beispiel der Berechnung eines Filters. Hilfsnomogramm. 122 Angaben über die üblichen Filter. 123 Änderung des Filters durch Bestrahlung. 124 Temperatureinfluß. 125 Störung durch Eigenfluoreszenz des Filters. 126 Metallfilter. 127 Durchlässigkeit von Gasen und Dämpfen. 128 Filterdurchlässigkeit außerhalb des UV. 129 Durchlässigkeit der menschlichen Haut, des Blutes und der Schutzsalben	
E. Spektrale Zerlegung ohne Prisma	133
130 Filter-Monochromatoren. 131 Kontrolle durch Gegenfilter. 132 Christiansen-Filter. 133 Ausnutzung der chromatischen Fehler von Linsen. 134 Monochromator als Filter. Varioilluminator	
F. Durchführung von verschiedenen Spektralmessungen	137
a) Bestimmung der Durchlässigkeit und des Extinktionskoeffizienten von Filtern	137

135 Strahlenquelle. Spalt. Anordnung des Filters. 136 Strahlungsschwächungsverfahren. 137 Strommessungsverfahren. 138 Fehlermöglichkeit durch Streulicht. 139 Bestimmung des Extinktionskoeffizienten	
b) Bestimmung des Reflexionsvermögens	141
140 Allgemeines. 141 Messung der spiegelnden Reflexion. 142 Messung der diffusen Reflexion. 143 Daten über das Reflexionsvermögen verschiedener Stoffe	
c) Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von selektiven Strahlungsempfängern	145
144 Allgemeines. Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeitsverteilung. 145 Allgemeine Angaben über absolute Eichung. 146 Absolute Eichung auf Bestrahlungsstärke. 147 Absolute Eichung auf Strahlungsfluß und Ausbeute. 148 Ermittlung der absoluten Empfindlichkeit bei Eichung mit einem Wellenlängenbereich. 149 Absolute Eichung mit UV-Normal. 150 Bestimmung der Wellenlängenabhängigkeit biologischer und photochemischer Vorgänge. 151 Mehrfilterverfahren zur Ermittlung von spektralen Empfindlichkeiten	
d) Messung der spektralen Intensitätsverteilung von Linienspektren	153
152 Aufstellung. Monochromatordurchlässigkeit. 153 Bestimmung der relativen spektralen Intensitätsverteilung. 154 Anschluß der relativen Messung an eine absolute bei einer Wellenlänge. 155 Anschluß der relativen Messung an die absolute Messung eines Wellenlängenbereiches, insbesondere mit einer absolut geeichten Photozelle	
e) Messung der spektralen Intensitätsverteilung von kontinuierlichen Spektren	157
156 Dispersionvermögen, 157 Relative Messung. 158 Absolute Messung. 159 Intensitätsverteilung in einem aus Kontinuum und Linien bestehenden Spektrum	
f) Durchführung von spektralen Messungen mit der photographischen Platte	160
160 Arbeiten mit Schwärzungsmarken. 161 Anwendungen	
G. Strahlungsmessungen ohne spektrale Zerlegung, insbesondere unter Verwendung von Filtern und photochemischen Umsetzungen. Dosimetrie	162
162 Aufgabenstellung	
a) Strahlungsmessungen unter Verwendung von Filtern	162
163 Strahlungsempfänger und Filter. 164 Die Kadmiumpelle in ihrer Verwendung für integrierende Strahlungsmessungen. 165 Die Natriumpelle in ihrer Verwendung für integrierende Strahlungsmessungen. 166 Das Photoelement (Sperrschichtzelle) für integrierende Strahlungsmessungen. 167 Das Thermoelement für integrierende Strahlungsmessungen. 168 Kontrolle durch Gegenfilter. 169 Fehlermöglichkeit bei Verwendung von Filtern. 170 Bestimmung des Strahlungsflusses mit der Ulbrichtschen Kugel. 171 Differenzverfahren. 172 Auswahl unter den für die Bewertung von UV-Strahlern in Frage kommenden Filtermeßmethoden. 173 Übersichtsmessung im Gesamtspektrum. 174 Fluoreszenzverfahren	
b) Photochemische Meßverfahren	174
175 UV-Schnellmesser. 176 Jodmethode. 177 Azeton-Methode und andere. 178 IG-Dosimeter	
c) Dosimetrie	177
179 Dosimetrie. 180 Biologische Einheiten und biologisch begründete Einheiten der UV-Strahlung	
H. Nachtrag zu E „Zerlegung ohne Prisma“	181
181 Verwendung der Totalreflexion zur spektralen Trennung. 182 Strahlungsmessungen unter Benutzung der spektralen Trennung durch Totalreflexion	

Kapitel IV

Physikalische, biologische und photochemische Wirkungen der UV-Strahlen und ihre Anwendung	185
A. Fluoreszenz und Phosphoreszenz nebst Anwendungen.	185
183 Allgemeines. 184 Resonanzfluoreszenz bei Gasen und Dämpfen. 185 Stockessches Gesetz. Energetische Ausbeute. 186 Abhängigkeit der Fluoreszenzstrahlung vom Aggregatzustand. 187 Leuchtphosphore. 188 Anwendung der Fluoreszenz und Phosphoreszenz in der Meßtechnik. 189 Analysenlampe. 190 Anwendungsbeispiele der Fluoreszenzanalyse. 191 Photographische Aufnahmen im Fluoreszenzlicht und im reflektierten UV. 192 Titration mit fluoreszierenden Indikatoren. 193 Ergänzende Bemerkungen zur Fluoreszenzanalyse. 194 Anwendung der Leuchtstoffe in der Lichttechnik	
B. Die biologischen Grundwirkungen der UV-Strahlung	196
195 Einleitung und Allgemeines über Wirkungsmechanismen. 196 Zellerstörende Wirkungen. 197 Photochemische Wirkungen. 198 Auswertung der biologischen Strahlungsreaktionen	
C. Erythem und Pigment	199
a) Erscheinung und Entstehung	199
199 Allgemeines. Äußere Erscheinungsformen. 200 Abhängigkeit von der Dosis. 201 Abhängigkeit von der Wellenlänge. 202 Additivität der Wirkung von Strahlung verschiedener Wellenlängen. 203 Lichtbiologische Konstitutionsforschung. 204 Verschiedene Abhängigkeiten der Erythemempfindlichkeit. 205 Absolute Erythemempfindlichkeit. 206 Einfluß der Unterteilung der Dosis. 207 Anatomie und Physiologie der menschlichen Haut. 208 Entstehung des Erythems. 209 Pigmentierung. 210 Strahlengewöhnung. 211 Schlußfolgerungen	
b) Methodik von Erythem- und Pigmentierungsversuchen	210
212 Allgemeine Bedeutung solcher Versuche. 213 Optische und elektrische Einstellung der Strahlenquelle. 214 Wahl der Teststelle. 215 Zeitpunkt der Ablesung. 216 Bestrahlungstreppe. 217 Ablesung der Bestrahlungstreppe. 218 Bestimmung der Erythemschwelldosis. 219 Bestimmung der Erythemgradation. 220 Lichtbiologische Konstitutionsforschung. 221 Einteilung der UV-Strahler nach Erythemschwelle und Erythemgradation. 222 Pigmentierungsversuche	
c) Lichtschutzmittel	216
223 Allgemeines. Forderung an Lichtschutzmittel. 224 Arten der Lichtschutzmittel. 225 Bestimmung der Schutzwirkung durch Messung der spektralen Durchlässigkeit. 226 Bewertung der Lichtschutzmittel. 227 Zusammenstellung der wichtigsten Lichtschutzmittel. 228 Sonstige Eigenschaften der Lichtschutzmittel	
D. Biologische Wirkungen der UV-Strahlung und ihre Anwendung in der Medizin	220
229 Allgemeine Bemerkungen. 230 Spektrale Wirkungskurven. 231 Wirkungen der UV-Bestrahlung auf Eiweißkörper. 232 Bakterientötende Wirkung. 233 Praktische Anwendung der bakterientötenden Wirkung. 234 Konjunktivitis. 235 Sichtbarkeit von UV-Strahlung. 236 Genmutation. 237 Beeinflussung des Atmungsfermentes. 238 Krebsentstehung durch UV. 239 Fördernde und antagonistische Wirkung von Strahlung anderer Spektralgebiete. 240 Lichtsensibilisatoren. 241 Allgemeine therapeutische Wirkungen. 242 Unspezifische Anwendung der UV-Bestrahlung bei Gesunden zur Förderung der Gesundheit und Steigerung der Leistungsfähigkeit. Bergarbeiterbestrahlung. 243 Gegenanzeige der UV-Bestrahlung. 244 Tuberkulose. 245 Hautkrankheiten. 246 Bestrahlung von Wunden. 247 Bestrahlung von Blut und anderen Körpersäften. 248 Bestrahlung bei Operationen. 249 UV-Bestrahlung in der Zahnheilkunde	

E. Rachitis und Vitamin D	234
250 Medizinische Grundlagen und Erscheinungsformen der Rachitis. 251 Heilung der Rachitis durch Vitamin D. 252 Ungünstige Nebenerscheinungen bei Vitamin-D-Anwendung. 253 Verschiedene Vitamin-D-Arten und ihre Entstehung. 254 Die internationale Vitamin-D-Einheit. 255 Bedarf an Vitamin D. 256 Bestimmung des Vitamin D. 257 Natürliches Vorkommen von Vitamin D. 258 Wellenlängenabhängigkeit der Rachitisheilung und Vitamin-D-Bildung. 259 Rachitisheilung durch Bestrahlung des menschlichen Körpers. 260 Bestrahlung von Arzneimitteln und Nahrungsmitteln (ohne Milch). 261 Grundsätzliches über Milchbestrahlung. 262 Technische Ausführung der Milchbestrahlung. 263 Rachitisbekämpfung als Aufgabe der Volkswohlfahrt	
F. Therapeutische Lampen und ihre Bewertung	244
264 Allgemeines. 265 Reflektor. Ausleuchtung des Bestrahlungsfeldes. 266 Reflektor. Verstärkungsfaktor. 267 Übersicht über die auf dem deutschen Markt befindlichen therapeutischen Lampen. 268 Hg-Hochdrucklampen mit festen Glühelktroden. 269 Hg-Hochdrucklampen mit flüssigen Hg-Elektroden. 270 Hg-Niederdrucklampen. 271 Andere Metaldampflampen. 272 Bogenlampen mit abbrennenden Elektroden. 273 Glühlampen. 274 Speziallampen. 275 Vergleich verschiedener Lampentypen untereinander und mit der Sonne. „Sonnenähnlichkeit“. 276 Bewertung verschiedener therapeutischer Lampen hinsichtlich Erythem- und Pigmenterzeugung. 277 Vergleich verschiedener therapeutischer Lampen hinsichtlich anderer biologischer Wirkungen. 278 Rechnerische Bewertung von UV-Strahlern, wenn absolute spektrale Intensitätsverteilung und biologische Wirkungskurve bekannt sind	
G. Technische Anwendung von UV-Strahlern	259
279 Überblick. 280 Entkeimung von Flüssigkeiten. 281 Lebensmittelfrischhaltung. 282 Entkeimung von Trinkgefäßen. 283 Getreideentmuffung. 284 Vitaminisierung. 285 Insektenfang. 286 Verwendung der UV-Strahlen bei der Pflanzenzucht. 287 Anwendung der Fluoreszenz. 288 Ionenerzeugung. Ozonisierung. 289 Aufhebung des Zündverzuges bei bestrahlten Funkenstrecken. 290 Optische Telephonie mit UV-Strahlung. 291 Bleichen. Farbechtheitsprüfung. 292 Lacklederhärtung. 293 Prüfung von Geräten auf Tropensicherheit. 294 Kesselsteinverhütung. 295 Lichtpauserei. 296 Anwendung von UV-Strahlern in der photographischen Technik. 297 Herstellung kornfreier Filmkopien. 298 Anordnungen zur Durchführung photochemischer Umsetzungen. 299 Durchführung von photochemischen Versuchen. 300 Anwendung ultravioletter Strahlung zur Polymerisation von Kunststoffen	
Anhang	275
Tabelle A: Bezeichnungen für Strahlungsgrößen	
Tabelle B: Umrechnung verschiedener Leistungs- und Energiemaße	
Tabelle C: Durchlassungsvermögen und Extinktion	
Schrifttum	278
Sachverzeichnis	308

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 (I. 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 sollen.

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 den Brechungsgesetzen 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⁾ Kursivziffern in Klammern, z. B. (128), verweisen auf das Schrifttumverzeichnis auf S. 278 bis 302. 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 cm² pro Sekunde auftreffende Energie heißt Bestrahlungsstärke (Beleuchtungsstärke²⁾) und wird in Watt/cm² gemessen. In der Meteorologie wird diese Größe auch in cal/cm² · 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 Watt · sek/cm² oder cal/cm².

Beispiel: Wirkt eine Bestrahlungsstärke $B = 0,034$ Watt/cm² während der Zeit $t = 220$ sek ein, so ist die auf die Fläche von 1 cm² auftreffende Bestrahlung $B \cdot t = 0,034 \cdot 220 = 7,5$ Watt · sek/cm². 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 Watt/cm² angegeben wird. Diese Größe gibt an, welche Energie in der Sekunde von der Flächeneinheit der Strahlungsquelle in die Raumwinkeleinheit⁵⁾ ausgestrahlt wird. Die Bestrahlungsstärke dagegen gibt die von 1 cm² Fläche in den Halbraum in 1 Sekunde abgestrahlte Energie an. Die Dimension ist Watt/cm². Durch Multiplikation der Strahldichte mit der strahlenden Fläche (in cm²) erhält man die Strahlstärke (Lichtstärke), die in Watt 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 $r = 2$ m die Bestrahlungsstärke $B = 0,01$ Watt/cm² = 10 mWatt/cm², so ist diese in $r' = 4$ m: $B' = B \cdot r^2/r'^2 = 10 \cdot 2^2/4^2 = 2,5$ mWatt/cm².

4. Wellennatur der Strahlung. Einteilung des UV. Die UV-Strahlung ist wie jede elektromagnetische Strahlung ein Schwingungsvorgang. Ein Schwingungsvorgang 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 bei Hg-Lampen z. B. auf die positive Säule, zu beziehen.

⁴⁾ 1 cal/cm² · min = 69,7 mWatt/cm². Vgl. auch Tabelle B im Anhang.

⁵⁾ Die Raumwinkeleinheit schneidet aus der Oberfläche einer Kugel von 1 cm Radius eine Fläche von 1 cm² 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 μ) oder $m\mu$ (200—400 $m\mu$) oder in Angström (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 COBLENTZ:

UV-A 315 bis 400 $m\mu$
 UV-B 280 bis 315 $m\mu$
 UV-C unterhalb 280 $m\mu$.

Die Abgrenzung dieser Bereiche ist unter dem Gesichtspunkt geschehen, daß UV-C vor allem keimtötend, UV-B vor allem antirachitisch und erythemerzeugend wirkt und UV-A Tiefenwirkung besitzt, die bei gewissen Krankheiten (Lupus) günstig ist. 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 Dampf-atmosphäre (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.

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

¹⁾ $1/1000$ mm = 1 μ = 1000 $m\mu$ = 10000 \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 $m\mu$.

Strichen dar. Die gesamte Bestrahlungsstärke, gemessen über alle Wellenlängenbereiche, ergibt sich als die Summe der den einzelnen Linien zugeordneten Strecken.

Ein kontinuierliches Spektrum denkt man sich in einzelne 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

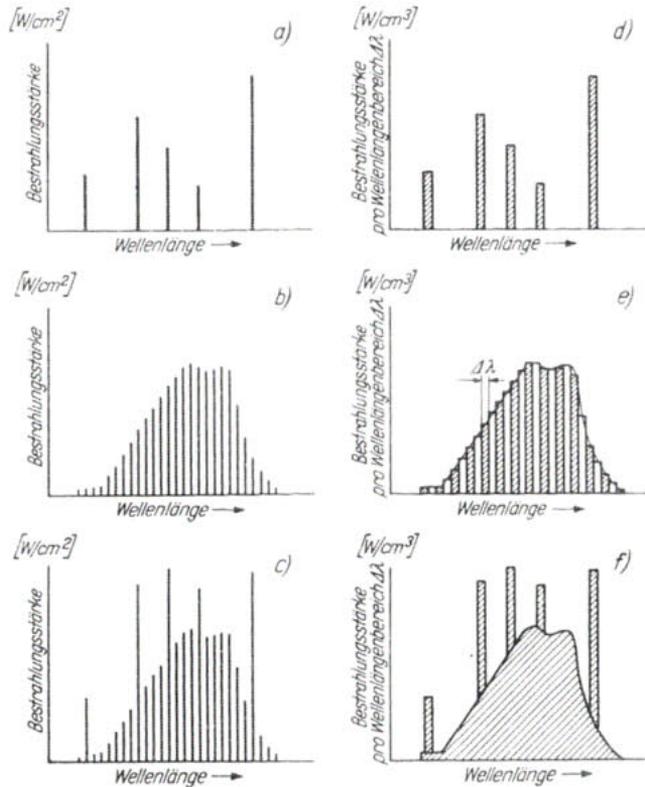


Abb. 1. Graphische Darstellung der spektralen Intensitätsverteilung. *a* und *d* für Linienspektrum, *b* und *e* für kontinuierliches Spektrum, *c* und *f* für Mischspektren. In der linken Abbildungshälfte (*a*, *b*, *c*) als Folge von Strecken, in der rechten Abbildungshälfte (*b*, *c*, *f*) als Folge von Flächen.

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 $\Delta\lambda = 1$ cm gewählt, während wir im folgenden stets $\Delta\lambda = 1$ m μ setzen. Um die in Watt/cm² pro Wellenlängenbereich 1 cm — wofür man auch Watt/cm³ schreibt — angegebene Bestrahlungsstärke in Watt/cm² pro 1 m μ umzurechnen, sind die Ordinatenwerte um den Faktor 10^7 zu verkleinern. Es gilt also: 50 Watt/cm³ = $50 \cdot 10^{-7}$ Watt/cm² je 1 m μ = 5 μ Watt/cm² je 1 m μ . 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 Strahlenquelle auf das Linienspektrum bzw. das Kontinuum entfällt, gibt Abb. 1 f durch Vergleich der Flächen ein sinnfälliges Maß, während aus Abb. 1 c 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. 1 e und f gewählt werden, während es sich bei Betrachtung von reinen Linienspektren empfiehlt, die Darstellung nach Abb. 1 a zugrunde zu legen.

Auch wenn es sich um die Darstellung anderer Strahlungsgrößen, z. B. Strahlungsfluß (Watt), Strahldichte (Watt/cm²) 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/cm³.

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 Bestrahlungsstärke nicht über der Wellenlänge, sondern über der Frequenz aufträgt, wobei man die Bestrahlungsstärke dann für einen Frequenzbereich angibt. Zur Erläuterung ist in Abb. 2 eine spektrale Intensitätsverteilung 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 insbes. die Lage des Maximums von der Wahl des Abszissenmaßstabes abhängt. Das ist dadurch begründet, daß man einmal die Strahlungsstärke 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.

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

¹⁾ Bezeichnet man mit I_λ die Strahlenintensität 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.

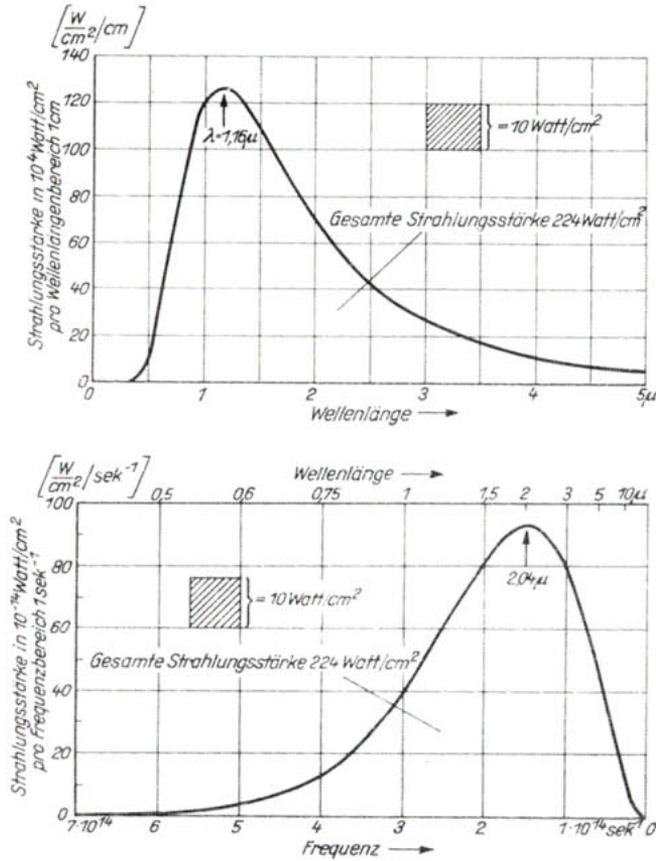


Abb. 2. Spektrale Energieverteilung eines schwarzen Körpers von $T=2500^\circ \text{K}$, oben bezogen auf gleiche Wellenlängenbereiche, unten auf gleiche Frequenzbereiche. Die Gesamtstrahlungsstärke ist in beiden Fällen gleich. Der Maßstab wurde so gewählt, daß die zwischen Kurve und Abszissenachse liegende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

der Winkel, unter dem der Strahl reflektiert wird, wellenlängenunabhängig ist, daß dagegen 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 Strahlengemisches 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 auseinander gezogen 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 GROTTIUS-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



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

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 Lichtquantums gleich dem Produkt aus einer universellen Konstanten $h = 6,61 \cdot 10^{-34}$ Watt \cdot 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.

Um einen Begriff von der Größe eines Lichtquantums zu geben, sei ein konkretes Beispiel überschlagsweise gerechnet. Ein Lichtquant der Wellenlänge 366 m μ hat $5,4 \cdot 10^{-19}$ Watt \cdot 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 cm² etwa 10^{-4} Watt. Das sind demnach in der Sekunde rund $2 \cdot 10^{14}$ Lichtquanten der Wellenlänge 366 m μ .

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 Lichtquantums 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

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

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

10. Photochemische Wirkungen. Die wichtigste Wirkung absorbierter 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 Zusammenwirkung 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 diese 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 (133, 182, 223, 232)

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 tor^1) 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.

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 400000 mal) größer, ihre

¹⁾ 1 tor = 1 mm Quecksilbersäule = 1 mm Hg

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 Metaldampf- 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.

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

¹⁾ Nach dem BOHR'schen 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 freierwerdende Energie wird als Strahlung ausgesandt.

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 Mindestbetriebsspannung und 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 im Elektronen-Volt angegeben wird, ist eine Stoffkonstante, die stark von der Oberflächenbeschaffenheit z. B. Gasbeladung, Oxydation abhängt. Sie beträgt (vgl. Zahlentafel 1) 0,5 bis 10 Elektronen-Volt und ist am niedrigsten bei den Alkalimetallen und Erd-

alkalimetallen. Je niedriger die Austrittsarbeit, um so größere Stromdichten sind an einer kalten Kathode zulässig.

Zahlentafel 1
Kathodenfall und Austrittsarbeit (133)

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. Zahlentafel 1). 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 Zahlentafel 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,

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.

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 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 Stromeinführung verzichten kann.

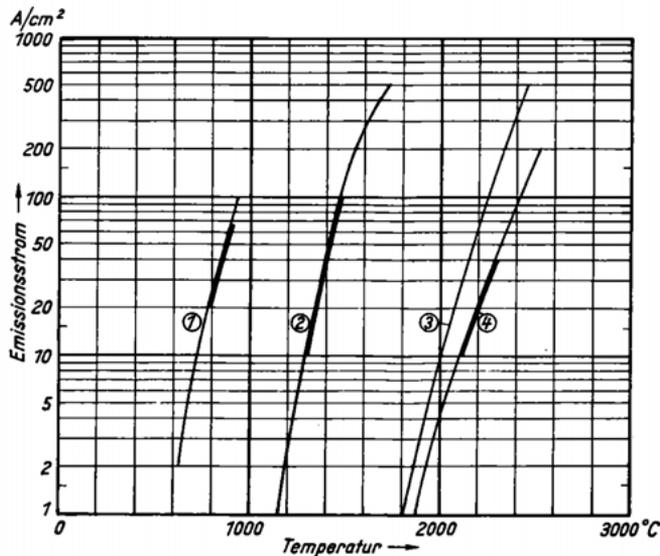


Abb. 4. Der Emissionsstrom je cm^2 Oberfläche einer Glühkathode für BaO- und SrO-Paste auf Platin (1), Th auf Wolfram (2), Molybdän (3) und Wolfram (4) in Abhängigkeit von der Temperatur der Kathode. Nach ESPE und KNOLL (134).

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 1000° 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.

18. Feldkathode. 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.

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/cm²). 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 A/cm² 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 Feldkathode 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, Fremdbeheizung 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 Strahlenintensität 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 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 Klemmenspannung²⁾ 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 ausreichender Genauigkeit ermittelt werden, indem man von der gemessenen Klemmenspannung 10 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 (128).

¹⁾ Hiervon ist der Einbrennvorgang 49 zu unterscheiden, der wegen des allmählichen Anstieges des Metaldampfdruckes auf den Betriebswert mehrere Minuten dauert.

²⁾ Vgl. 21.

b) Elektrische Eigenschaften von Entladungsröhren¹⁾ (133, 164, 182, 232)

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 .

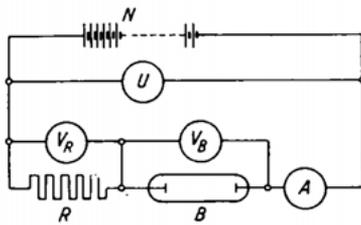


Abb. 5. Prinzipschaltbild einer Entladungsröhre. B Entladungsröhre, R Stabilisierungswiderstand, N Spannungsquelle, A Amperemeter, V_B bzw. V_R Voltmeter zur Messung der Klemmenspannung an der Entladungsröhre bzw. am Widerstand, U Voltmeter zur Messung der Netzspannung.

Bei gegebener Spannung der Batterie und gegebenem Widerstand beobachtet man einen bestimmten Entladungsstrom I und eine bestimmte Spannung V_B an der Entladungsröhre, die Klemmenspannung²⁾. Diese beiden Größen I und V_B können durch Veränderung des Widerstandes 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 der Spannungsquelle (U) sein.

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. negativ³⁾, weil mit steigendem Strom die Klemmenspannung abnimmt.

Alle Gasentladungsröhren, auf die später eingegangen wird, besitzen eine fallende Kennlinie 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,

¹⁾ Die folgenden Betrachtungen gelten im wesentlichen auch für Bogenlampen mit abbrennenden Elektroden.

²⁾ Die Bezeichnung Brennspannung, die vielfach gleichlautend mit Klemmenspannung verwendet wird, soll für eine besondere Größe der Wechselstromentladung vorbehalten bleiben (vgl. 25 u. 26).

³⁾ 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.

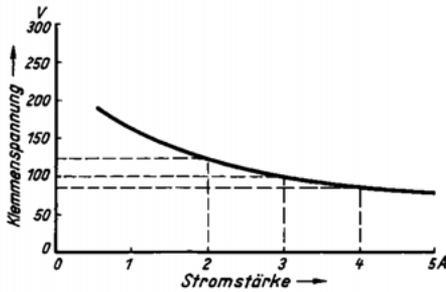


Abb. 6. Stromspannungskennlinie einer Gleichstromentladung.

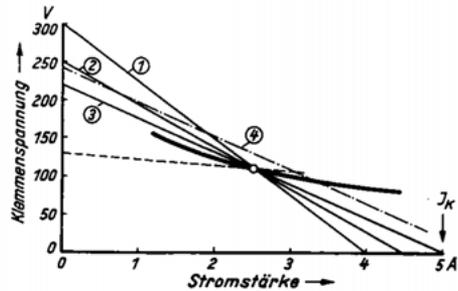


Abb. 7. Widerstandsgeraden und Stromspannungskennlinie einer Gleichstromentladung.

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

$$V_B = U - I \cdot R$$

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 Vorwiderstand. 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 Vorschalt-

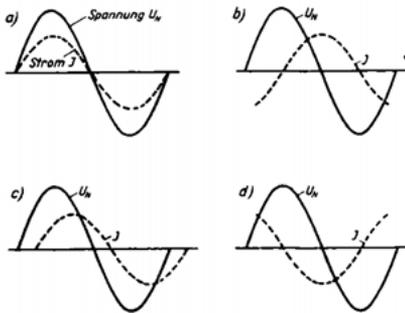


Abb. 8. Zeitlicher Verlauf von Spannung und Stromstärke an verschiedenen Wechselstromwiderständen. a) OHMScher Widerstand, b) Selbstinduktion, c) Selbstinduktion mit OHMSchem Widerstand und d) Kondensator.

widerstand 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. 8a 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. 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.

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 Zeitmoment, 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 Rechnungsgröße 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: Gegebenen 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.

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-

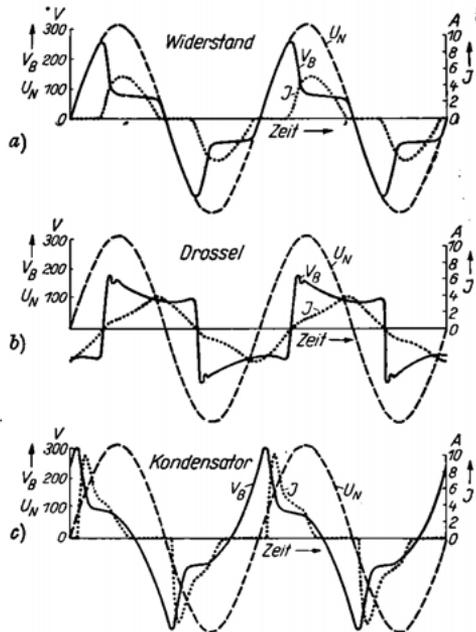


Abb. 9. Zeitlicher Verlauf der Netzspannung (U_N), der Klemmenspannung (V_B) und der Stromstärke (I) einer mit Wechselstrom von 50 Hz betriebenen Hochdrucklampe (S 300). Bei a) diente ein OHMScher Widerstand, bei b) eine Drossel, bei c) ein Kondensator als Stabilisierungswiderstand.

¹⁾ Hitzdraht-, Weicheisen-, dynamometrische und elektrostatistische Instrumente zeigen unmittelbar den Effektivwert an. Die neuerdings häufiger verwendeten Drehpulvinstrumente 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 in Abb 9b.