

Radioaktive Leuchtfarben

Von

Prof. Dr. G. Berndt

Wissensch. Mitarbeiter der Opt. Anstalt C. P. Goerz, A.-G., Berlin-Friedenau
Privatdozent an der Technischen Hochschule Charlottenburg

Mit 28 Figuren im Text und auf 1 Tafel



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Herausgeber dieses Heftes :
Geh. Rat Prof. Dr. K. Scheel, Berlin

ISBN 978-3-663-06657-6 ISBN 978-3-663-07570-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-07570-7

Alle Rechte vorbehalten.

Copyright, 1920, by Springer Fachmedien Wiesbaden
Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Germany 1920
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1920

V o r w o r t.

Die radioaktiven Leuchtfarben werden in immer steigendem Maße zur Ausrüstung von selbstleuchtenden Uhren und Instrumenten benutzt, so daß sich für ihre Herstellung ein neuer Industriezweig entwickelt hat, der durch seinen Jahresumsatz auch schon eine gewisse volkswirtschaftliche Bedeutung hat. Merkwürdigerweise findet man aber in der großen Reihe der Verbraucher selten eine klare Vorstellung über das Wesen und die Wirkung der radioaktiven Leuchtfarben und noch weniger über die Vor- und Nachteile der Radium- und Mesothorleuchtfarben; aber auch unter den Fachleuten herrscht häufig ein gänzlich ungerechtfertigtes Vorurteil gegen diese. Es schien deshalb wünschenswert, die wissenschaftlichen Grundlagen für den Prozeß des radioaktiven Leuchtens, die Methoden zur Messung und Prüfung der Leuchtfarben, sowie die Ergebnisse über ihr Verhalten im Zusammenhang zu schildern. Letztere waren bisher nur spärlich zu finden und beschränkten sich, von seltenen Ausnahmen abgesehen, auf gelegentliche Bemerkungen in populären Artikeln, die deshalb auch möglichst vollständig berücksichtigt sind.

Einen besonderen Wert wird aber, hoffe ich, diese Darstellung darin haben, daß sie eine große Reihe eigener, bisher nicht veröffentlichter Messungen enthält, welche im physikalischen Laboratorium der Optischen Anstalt C. P. Goerz, A.-G., Berlin-Friedenau, ausgeführt wurden, und die neben anderem auch zum erstenmal einen Überblick über die Haltbarkeit bzw. den Abfall der Helligkeit der radioaktiven Leuchtfarben geben. Für die entsprechenden Messungen an Mesothor-

und Radiothorleuchtfarben waren dazu geeignete Präparate von der Gesellschaft für Verwertung chemischer Produkte, Berlin, zur Verfügung gestellt.

Herrn Dr. Werner bin ich für einige Hinweise in dem Kapitel Phosphoreszenz zu Dank verpflichtet.

Bei dem möglichst ausführlich gehaltenen Sachregister glaubte ich von einem alphabetischen Inhaltsverzeichnis absehen zu können.

Berlin-Friedenau, Juli 1919.

Berndt.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Kapitel. Phosphoreszenz	1
2. Kapitel. Radioaktivität	10
a) Zerfallstheorie	10
b) Die radioaktiven Familien	18
1. Isotope	18
2. Die Uranreihe	20
3. Die Thorreihe	23
c) Die radioaktiven Strahlen	25
d) Radiolumineszenz	32
3. Kapitel. Meßmethoden	35
a) Radioaktive Messungen	35
1. Einleitung	35
2. α -Strahlenmessung	37
3. γ -Strahlenmessung	39
4. Emanationsmessung	43
b) Lichtmessungen	44
4. Kapitel. Zusammensetzung und Herstellung der Leuchtfarben	49
a) Einleitung	49
b) Radiumleuchtfarben	51
c) Radiothorleuchtfarben	54
d) Mesothorleuchtfarben	56
1. Reine Mesothorleuchtfarben	56
2. Leuchtfarben aus Mischung von Mesothor und Radiothor	61
e) Die Herstellung von Leuchtfarben	64
5. Kapitel. Prüfung und Messung der Leuchtfarben	65
a) Helligkeit der Leuchtfarben	65
1. Einfluß der Schichtdicke	65
2. Einfluß des Radiumgehaltes	71
3. Absolute Photometrie der Leuchtfarben	74
4. Die Helligkeit von Leuchtschirmen	76
5. Einfluß der Vorbelichtung	76
6. Der Abfall der Helligkeit	78
b) Das Spektrum der Leuchtfarben	90
6. Kapitel. Die Verwendung der radioaktiven Leuchtfarben	92
7. Kapitel. Statistik und Ökonomie der Leuchtfarben	99
a) Statistik	99
b) Die Ökonomie der Leuchtfarben	101
Tabelle I. Radioaktive Familien	104
Literaturverzeichnis	106

1. Kapitel.

Phosphoreszenz.

Radioaktive Leuchtfarben sind Gemenge aus radioaktiven Substanzen und Stoffen, welche durch die von jenen ausgehenden Strahlen zu dauernder Lumineszenz erregt werden. Unter diesem Begriffe faßt man alle diejenigen Lichterscheinungen zusammen, welche ohne merkliche Temperaturerhöhung der leuchtenden Körper erfolgen. Sie kann vor allem erregt werden durch Bestrahlung mit Licht; verschwindet diese Photolumineszenz, wie z. B. bei Petroleum, Chininlösung u. ä., zugleich mit der Erregung, so nennt man sie Fluoreszenz, dauert sie dagegen noch kürzere oder längere Zeit darüber hinaus an, Phosphoreszenz. Photolumineszenz von beträchtlicher Nachdauer ist bisher, außer bei den Seleniden, nur bei den Sulfiden der Erdalkalimetalle und des Zinks beobachtet, die man deshalb als phosphoreszierende Substanzen im engeren Sinne oder kurz als Phosphore bezeichnet. Eine strenge Grenze läßt sich zwischen den beiden Erscheinungen nicht ziehen und wird mit der Verfeinerung der Beobachtungsmittel immer weiter verschoben; es ist deshalb wohl am besten, wenn man von Fluoreszenz nur bei flüssigen und von Phosphoreszenz, unabhängig von ihrer Dauer, nur bei festen Körpern spricht. Diese steht nun in einer gewissen Analogie zu dem radioaktiven Leuchten, das man sinngemäß als Radiolumineszenz zu bezeichnen hat (dabei geht die Erregung durch radioaktive Strahlen aber durchaus nicht parallel zu der durch Licht). Es wird sich nun empfehlen, den Vorgang der Phosphoreszenz, und zwar besonders am Zinksulfid, genauer zu studieren, da gerade dieses besonders gut radioluminesziert.

Weitere Unterklassen wären die Tribo-, die Elektro- und die Chemilumineszenz, bei welchen die Lichtaussendung durch Druck oder Stoß, elektrische Entladungen (in Geißleröhren) und durch chemische Prozesse erregt wird. Sie lassen sich, wie die Photolumineszenz, auf Elektronenvorgänge zurückführen, sind aber ihr gegenüber von geringerer Bedeutung.

Im Anfang des 17. Jahrhunderts (1602 bis 1604) fand ein Bologneser Schuhmacher Vincenzo Cascariolo, daß ein Mineral von Monte Paterno — es war der Schwerspat — nach dem Glühen mit Kohle die Eigenschaft hatte, im Dunkeln zu leuchten, doch mußte er dazu, wie sich bald herausstellte, vorher dem Lichte ausgesetzt gewesen sein. Mit dieser zufälligen Entdeckung beginnt, soweit bekannt, die Geschichte der Phosphoreszenz. Das Rätselhafte des „Bologneser Leuchtsteines“ oder „glühenden Zaubersteines“ veranlaßte seine Verwendung zu allerhand Spielereien, ohne daß man jedoch einer wissenschaftlichen Erklärung dieser merkwürdigen Erscheinung näher kam. Im Laufe der Zeit gelang es dann, eine ganze Reihe von Phosphoren herzustellen, von denen die Balmainsche Leuchtfarbe, das Sulfid des Calciums, und die Sidot-Blende, das hexagonal kristallisierende Zinksulfid, die bekanntesten geworden sind. Voraussetzung bei allen Phosphoren ist indessen, daß sie in der Glühhitze hergestellt werden, während die nur auf nassem Wege erzeugten nicht leuchten.

Trotz verschiedener vorhergehender Untersuchungen — als wichtigste aus dieser Zeit seien die von E. und H. Becquerel^{1) 2)}, sowie von E. Wiedemann²⁶⁾ und E. Wiedemann und G. C. Schmidt²⁷⁾ erwähnt, welche die Lumineszenz auf chemische Umsetzungen zwischen einer stabilen und einer labilen Modifikation zurückzuführen suchten — brachten erst die Arbeiten von P. Leonard^{7)–11)} und seinen Mitarbeitern und Schülern Aufklärung über den Vorgang der Phosphoreszenz. Sie stellten zunächst fest⁷⁾, daß das geglühte, völlig reine Sulfid nicht nachleuchtet, sondern daß dazu der Zusatz gewisser Metalle — es kommen vor allem Kupfer, Wismut und Zink, daneben auch Silber, Mangan, Blei, Nickel, Antimon in Frage — in der allerdings sehr geringen Menge von weniger als $\frac{1}{10}$ mg auf 1 g Sulfid nötig ist. Ferner ist ein schmelzbarer Zusatz eines meist farblosen Salzes (etwa Glaubersalz) erforderlich, damit der Phosphor emailleartig zusammensintert und die Atome des Erdalkalimetalles denen des Schwefels mehr genähert werden, wodurch ihr Zusammenwirken erst ermöglicht wird; ohne den Schmelzzusatz erhält man nur eine lockere, pulverige, gar nicht oder schlecht leuchtende Masse*). Sie erzielten ferner eine wesentliche Verbesserung in bezug auf Lichtstärke und Leucht-

*) Zur Charakterisierung der verschiedenen Phosphore hat sich die Regel eingebürgert, sie durch die Angabe der drei in ihnen vorkommenden Metalle (in der Reihenfolge Sulfid, wirksames Metall, Schmelzzusatz) zu kennzeichnen.

dauer durch Benutzung sehr reiner Ausgangsmaterialien; daneben ist aber die Art des Glühprozesses und die dadurch bedingte Korngröße von großem Einfluß. Rezepte, die gewisse Hinweise für die Erzeugung von Phosphoren geben, findet man vielfach^{5) 19) 24) 30)}, doch haben die verschiedenen Firmen, welche speziell Sidotblende herstellen (Chinifabrik Buchler & Co., Braunschweig; E. de Haën, List bei Hannover; C. A. F. Kahlbaum, Adlershof bei Berlin), ihre besonderen, geheim gehaltenen Verfahren.

Das emittierte Phosphoreszenzlicht besteht immer aus mehreren Spektralbanden. So beobachtet man am Zinksulfid bei gewöhnlicher Temperatur eine sich von 580 bis 460 $\mu\mu$ erstreckende gelbgrüne Bande, deren Maximum verschieden, zu 510 $\mu\mu$ ¹²⁾, 520 $\mu\mu$ ²³⁾ und 550 $\mu\mu$ ²¹⁾ angegeben wird *). Die Unterschiede dürften durch verschiedene Ausgangsmaterialien bedingt sein; da nämlich der Zn-Cu-Phosphor zwei (nahe beieinander liegende) Maxima bei 515 und 560 $\mu\mu$ und der mit lachsfarbenem Licht euchtende Zn-Mn-Phosphor ein solches bei 580 $\mu\mu$ hat¹⁹⁾, so wird sich die Lage des Gesamtmaximums, je nach dem Verhältnis der beiden (ja nur in Spuren vorhandenen) Metalle zwischen den angegebenen Grenzen bewegen können. Bei geeigneter Erregung setzt sich das Spektrum weiter nach dem Violett hin fort und es tritt ein zweites Maximum bei 410 $\mu\mu$ auf; diese violette Bande wird besonders durch ultraviolette Licht und Röntgenstrahlen, und zwar durch die von ihnen ausgelösten sekundären Kathodenstrahlen, stark erregt. Ein weiteres Maximum scheint noch in Rot jenseits 620 $\mu\mu$ zu liegen^{12) 21)}. Im allgemeinen erfolgt der Abfall der Maxima nach dem Rot zu steiler, während sie nach den kürzeren Wellenlängen hin einen allmählich abklingenden, schweifähnlichen Fortsatz aufweisen⁹⁾. Die Anzahl und das Intensitätsverhältnis der verschiedenen Banden hängt, außer von dem Metallgehalt, dem Sulfid und dem Schmelzzusatz, von der Erregung ab, so daß sich damit auch die Farbe des Phosphoreszenzlichtes ändern kann**). Einen sehr großen Einfluß übt ferner auch die Temperatur aus; so ist das Intensitätsverhältnis der grünen zur violetten Zinksulfidbande¹⁸⁾ bei +20° 1,83, bei -63° 1,00 und bei -175° 0,23; ähnliche Änderungen beobachtet man an einigen Phosphoren auch bei der Abklingung. Bei der Sidotblende hat man festgestellt, daß die ver-

*) Eigene Aufnahmen (s. 5. Kapitel) lieferten eine sich von 610 bis 450 $\mu\mu$ erstreckende Bande mit dem Maximum bei 555 $\mu\mu$.

***) Ausführliche Angaben hierüber bei Lenard und Klatt⁷⁾.

schiedenen Wellenlängen der auf das Auge ausschließlich einwirkenden gelbgrünen Bande hierbei alle im gleichen Verhältnis schwächer werden ¹²⁾ ¹⁴⁾ ¹⁸⁾ ²²⁾ ²³⁾).

Unterbricht man die Bestrahlung eines Phosphors, so erfolgt in wenigen hundertstel Sekunden ein starkes Nachlassen des Leuchtens [von Lenard ⁹⁾ ¹¹⁾ als Momentanprozeß bezeichnet]. Das nun noch andauernde eigentliche Phosphoreszenzlicht besteht aber auch noch aus zwei getrennten Vorgängen, dem Ultraviolett- und dem Dauerprozeß. Jener wird hauptsächlich durch ultraviolettes Licht und Kathodenstrahlen erregt und ist in spätestens 60 Sekunden vollständig abgeklungen, während sich der (auf einen bestimmten Temperaturbereich beschränkte) Dauerprozeß beträchtliche Zeit, bei einigen Phosphoren stunden- und tagelang, verfolgen läßt. Im allgemeinen herrscht die Regel, daß die hellsten Phosphore auch am schnellsten abklingen [die sehr hell leuchtende Sidotblende z. B. nach H. Hinterberger ⁷⁾ in 45 Minuten]. Umgekehrt gilt, daß langdauernde Phosphore einer längeren Bestrahlungszeit zu ihrer vollen Erregung bedürfen, als die nur kurze Zeit nachleuchtenden. Das sehr helle, aber nur kurz andauernde Leuchten nach Erregungsschluß ist auf eine ultrarote Spektralbande zurückzuführen [Zinksulfid zeigt aber weder diese, noch auch eine ultraviolette Bande ¹⁹⁾]. Zur Erklärung dieser Erscheinung nimmt Lenard ⁸⁾ ⁹⁾ an, daß nicht sämtliche Moleküle phosphoreszenzfähig sind, sondern die Lichtaussendung an verhältnismäßig wenige in einer großen Masse unwirksamer Sulfidmoleküle eingebettete, komplexe Moleküle (Zentren) gebunden ist [ihr Verhältnis ist etwa 1 zu 50000 ¹¹⁾]. Diese zeichnen sich dadurch aus, daß sie neben dem Erdalkalimetall und dem Schwefel auch noch das wirksame Metall enthalten, woraus sofort folgt, daß bei geringem Metallgehalt die gesamte aufgespeicherte Lichtenergie hierzu proportional sein muß. Die Zentren der drei einzelnen Prozesse sind nun verschieden aufgebaut ⁹⁾. Die Dauerzentren bilden (bei der Sidotblende) Moleküle von der empirischen Formel $x \text{ Zn}, y \text{ Cu}, z \text{ S}$ und sind wahrscheinlich ziemlich voluminöse, sperrige, vielleicht auch kettenringförmig geschlossene Gebilde von der Form S—Zn—S—Zn—... , wobei das Kupfer an den Schwefelatomen durch Nebenvalenzen festgehalten wird. Auch die Dauerzentren sind aber nicht alle gleichartig, zum mindesten muß es für jede einzelne Spektralbande eine andere Zentrenart geben, bei der Sidotblende also mindestens zwei. Lenard erklärt diese durch die verschiedenen Valenzen der wirksamen Metallatome, woraus folgt, daß die Zahl der Banden

nicht größer als die maximale Zahl der Valenzen sein kann. Weitere Unterschiede könnten nun noch auftreten durch die Verschiedenartigkeit der vier Nebervalenzen des Schwefelatoms, also durch stereochemische Unterschiede, doch liefern diese alle dieselbe Bande.

Die komplexen Zentren sind nun lichtelektrisch, und zwar selektiv empfindlich. Bei Bestrahlung mit Licht geeigneter Wellenlänge (jede Bande hat ihre besondere spektrale Erregungsverteilung) werden die lichtelektrischen Elektronen aus ihnen befreit [dabei ist ihre Anfangsgeschwindigkeit von etwa der gleichen geringen Größenordnung wie bei den Metallen⁸⁾], doch können sie die Oberfläche im allgemeinen nicht verlassen, sondern werden in den benachbarten Schwefelatomen festgehalten. Die phosphoreszierenden Substanzen sind also als Lichtakkumulatoren aufzufassen, welche die absorbierte Lichtenergie in potentielle Energie der durch das Licht von dem wirksamen Metall abgespalteten lichtelektrischen Elektronen in den Schwefelatomen der Zentren aufspeichern. Infolge der molekularen Wärmebewegung werden sie indessen von diesen allmählich wieder abgegeben, kehren zu ihren Zentren zurück und erregen hierbei durch Resonanz andere Elektronen, die Emissionselektronen, deren Schwingungen das eigentliche Phosphoreszenzlicht darstellen; diese sind wahrscheinlich nicht freie Elektronen, sondern schwingen vielleicht mit dem Metallatom zusammen und werden dabei durch seine spezielle Umgebung beeinflusst. Faßt man das Metallatom als elektrischen Oszillator auf, so muß die Größe $\lambda/\sqrt{D} = \text{const.}$ sein (λ die Wellenlänge analoger Banden verschiedener Phosphore, D ihre Dielektrizitätskonstante), was auch an einer Reihe von Phosphoren gut bestätigt ist¹⁹⁾.

Aus dieser Theorie erklärt sich auch sehr einfach die auslöschende Wirkung von Wärme und ultraroten Strahlen, wie sie etwa von einer photographischen Dunkelkammerlampe ausgesandt werden. Durch $1/2$ bis 1 Minute währende Bestrahlung wird, besonders beim Zinksulfid, selbst helles Phosphoreszenzleuchten praktisch völlig zum Verschwinden gebracht. Durch die hierbei erfolgende Erwärmung und die dadurch erhöhte molekulare Beweglichkeit kommen nämlich die Schwefelatome den Metallatomen so nahe, daß diese ihnen die aufgespeicherten Elektronen sehr schnell entziehen. Deshalb beobachtet man auch bei höheren Temperaturen ein intensiveres, im selben Verhältnis aber schneller abklingendes Leuchten^{10) 21)}. Hierbei bleibt die Lichtsumme¹⁰⁾, d. h. das Zeitintegral über die emittierte Lichtintensität jeder einzelnen Bande

(welche ein Maß für die Zahl der bei der Erregung abgespalteten Elektronen ist) konstant, doch gilt dies für die Auslöschung durch Ultrarot nicht.

Im Gegensatz zu den Zentren des Dauerprozesses nimmt Lenard die des Momentanprozesses als schwefelfrei an und vermutet, daß die Metallatome bei diesen an Nebervalenzen des Sauerstoffs gebunden sind. Sie geben alle dieselbe Wellenlänge, ihre Schwingungszahlen sind aber von denen der Dauerzentren verschieden, doch scheint — soweit bis jetzt bekannt — beim Zinksulfid kein Unterschied zwischen den Banden des Momentan- und des Dauerprozesses zu bestehen. Da die Momentanzentren durch Wärmestrahlung im stärkeren Maße beeinflußt werden, so wird man sie als kleinere Atomkomplexe auffassen können.

Der Ultraviolettprozeß schließlich ist durch Auslösung von Elektronen auch an gewöhnlichen Atomen bedingt und ist als eine durch lichtelektrische sekundäre Kathodenstrahlen erregte Phosphoreszenz aufzufassen, die besonders bei Phosphoren mit großem Metallgehalt erfolgt¹⁰). Dabei vermögen die Kathodenstrahlen bei einem Ca-Bi-Phosphor z. B. noch Elektronen am Wismut auszulösen, wenn sie weit außerhalb des Atomquerschnittes an ihm vorbeigehen, und zwar bleiben sie bis zu einem Abstände von 32 Atomradien vom Atomzentrum wirksam. Die Maxima der durch Kathodenstrahlen an Zinksulfid (ferner auch an Willemit und einem Cd-Mn-Phosphor) erregten Banden liegen nach Nichols und Merritt¹⁷) an derselben Stelle wie bei Erregung durch Licht, so daß die Sidotblende in bezug auf das Spektrum ihres Phosphoreszenzlichtes ein besonders einfaches Verhalten zeigt.

Einen weiteren Einblick in den Aufbau und vor allem in die Entstehung der Zentren gewährt die Beobachtung Lenards¹⁰), daß mit zunehmender erregender Intensität die aufgespeicherte Lichtsumme bis zu einem Maximum anwächst, bei welchem die Zentren großer Dauer voll erregt sind, was auch durch Messungen von Nichols und Merritt¹⁴) bestätigt wird; diese maximale Lichtsumme ist völlig unabhängig von der Erregungsart. Sie ist ferner zunächst proportional dem Gehalt an wirksamem Metall¹¹), geht dann aber allmählich in einen konstanten Wert über. Trägt man also die Lichtsummen als Ordinaten gegen den Metallgehalt als Abszissen auf, so erhält man eine Kurve, die ähnlich wie die Sättigungsstromkurve verläuft. Bei sehr großem Metallgehalt fällt die Intensität indessen wieder ab bis zum Nichtleuchten²⁶), gleichzeitig nimmt der Phosphor dabei eine schmutzige Farbe an. Eine Er-

klärung für diese Erscheinung bietet die Annahme, daß bei der Herstellung des Phosphors, namentlich bei dem Glühprozeß, zunächst vorwiegend die Zentren langer Dauer, und zwar proportional dem Metallgehalt entstehen. Erst bei größerer Metallmenge werden auch Zentren kürzerer Dauer gebildet, die aber zur Lichtsumme nur einen geringfügigen Beitrag liefern. Je nach dem Metallgehalt, der Herstellungsart und auch der Temperatur, sowie der Erregung können dabei die Prozesse zueinander mehr vor- oder zurücktreten, und sich damit ihre Intensitätsverhältnisse völlig ändern.

Aus den theoretischen Vorstellungen kann man leicht das Gesetz für das Abklingen des Dauerleuchtens erhalten. Seine Intensität J wird jederzeit proportional sein der in der Zeiteinheit zum Metall zurückkehrenden Zahl der lichtelektrischen Elektronen; da diese nach dem Gesetz der Wiedervereinigung der Ionen in jedem Augenblicke proportional dem Quadrat ihrer zur Zeit t noch vorhandenen Anzahl n ist, so wird $J = \frac{dn}{dt} = -an^2$. Aus dieser Gleichung ergibt sich

durch Integration $J = \frac{a}{(c + at)^2}$ (c eine Integrationskonstante) oder

$1/\sqrt{J} = A + Bt = 1/\sqrt{J_0} + t/D$, wo J_0 die Anfangsintensität ist. Trägt man also in einem Koordinatensystem $1/\sqrt{J}$ als Ordinaten und die zugehörigen Zeiten t als Abszissen auf, so erhält man eine Gerade. Nichols und Merritt¹³⁾ leiten dieses Gesetz auf dieselbe Weise ab. Diese Folgerung ist auch von Werner²⁵⁾ an einer isolierten Bande eines Sr-Zn-Phosphors (Maximum bei $550 \mu\mu$) durch photographische Intensitätsmessungen für Zeiten von 21 Sekunden bis 30 Minuten sehr gut bestätigt. Die Bandendauer D hat sich dabei als unabhängig von der erregenden Intensität und auch vom Metallgehalt erwiesen²⁶⁾, dagegen hängt die Bandenintensität in einer nicht näher bestimmten Weise hiervon ab. Nichols und Merritt¹⁴⁾ finden dagegen bei der grünen Bande der Sidotblende die lineare Beziehung von $1/\sqrt{J}$ zu t auch in den ersten 10 Sekunden, bei welchen sich die verschiedenen Prozesse noch überlagern, bestätigt; dabei klingen in Übereinstimmung mit Beobachtungen von Waggoner²³⁾, die einzelnen Wellenlängen derselben Bande alle in gleicher Weise ab. Die Gerade geht für längere Zeiten, bei denen also der Dauerprozeß nur noch allein vorhanden ist, in eine solche mit anderer Neigung über. Dieses Gesetz der zwei durch eine gegen die Abszissenachse konkave Kurve miteinander verbundenen Geraden hat man nicht nur bei anderen Phosphoren, sondern auch für sehr kurze Zeiten [bis $0,07 \text{ Sek.}$ ²³⁾ ²⁹⁾], bei welchen also der Momentanprozeß eine überwiegende Rolle spielt, wieder gefunden; dabei hängt die Kurve von der Intensität und der Dauer der Erregung, sowie von der Vorgeschichte des Phosphors ab. Nach Messungen von Ives und Luckiesch⁶⁾ an Sidotblende kann das lineare Gesetz dagegen auf keinen Fall gelten, es ergibt sich vielmehr bei tiefen Temperaturen eine zur Abszissenachse kon-

kave, bei hohen dagegen hierzu konvexe Kurve. Die gefundenen Abweichungen sind indessen wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß nicht eine isolierte Bande, sondern das Gesamtlicht gemessen wurde^{9) 15) 20)}.

Später kommt Lenard¹¹⁾ zu dem Schluß, daß das Erlöschen der Dauerbanden im allgemeinen komplizierter ist, doch gilt das lineare Gesetz mit genügender Genauigkeit für die schnell abklingenden Phosphore und deshalb auch beim Zinksulfid für die Zeiten von 5 bis 60 Minuten nach Abstellung der Erregung; indessen treten auch hier für längere Zeiten beträchtliche Abweichungen auf. Diese rühren daher, daß die Größe dn/dt (welcher ja die Intensität proportional ist) nicht nur eine Funktion von n allein ist; selbst bei gleichem n hängt die Abklingung noch von der Art der Erregung und vor allem vom Metallgehalt (damit der Zentrenzahl) ab [doch ist beim Zinksulfid der letztere Einfluß nur gering]¹¹⁾. Man muß deshalb annehmen, daß für jede Phosphoreszenzbande die einzelnen Arten von Dauerzentren, die ja auch verschiedene räumliche Dimensionen besitzen, in anderer Weise abklingen. Nichols und Merritt¹⁶⁾ weisen darauf hin, daß die Abweichung von dem Gesetz $dn/dt = -an^2$ herrühren kann von ungleichmäßiger Verteilung des wirksamen Metalles, von Diffusion der Ionen und von komplexen Ionen. Die bisherigen Untersuchungen reichen aber nicht aus, um eine Entscheidung zwischen diesen verschiedenen Ursachen zu fällen.

Auch die Tribolumineszenz läßt sich auf Elektronenvorgänge zurückführen, und zwar dürfte am besten die von P. Lenard (Heid. Ber. 1914, 28. Abhdlg.; s. auch H. Schmidt, Naturw. 6, 641, 1918) aufgestellte Theorie den bisherigen Beobachtungen gerecht werden. Diese geht davon aus, daß bei der Kristallisation aus wässriger Lösung infolge der von den schon vorhandenen Kristallen auf die Moleküle ausgeübten Kräfte eine gewisse Orientierung derselben erfolgt, welche zur Bildung elektrischer Doppelschichten führt. Beim Zerbrechen der Kristalle — und ein Bruch ist zur Erzeugung der Tribolumineszenz nach H. Imhof (Phys. ZS. 18, 78, 374, 1917) stets nötig — tritt nun eine elektrische Entladung auf, welche die Lumineszenz der Kristallmoleküle und damit ein momentanes Leuchten erregt. In Einklang damit steht, daß alle tribolumineszierenden Substanzen durch ultraviolette Licht und langsame Kathodenstrahlen erregt werden. Die Tribo- wäre somit ein Spezialfall der Photolumineszenz. Auf die Radiolumineszenz können diese Vorstellungen aber kaum übertragen werden, da sie, soweit bisher wenigstens bekannt, nur bei den in der Glühhitze hergestellten Phosphoren, nicht aber bei der sehr umfangreichen Klasse der tribolumineszierenden Stoffe auftritt (siehe auch 2. Kapitel, d).

Über die Helligkeit des Phosphoreszenzlichtes liegen bisher keine direkten Messungen vor. Gley³⁾ gibt an, daß man bei Bestrahlung von Zinksulfid mit einer Wolframbogenlampe eine Helligkeit von mehreren Fußkerzen erzielt. Da eine Fußkerze gleich 11,84 Lux ist, so kann man die Beleuchtungsstärke E zu

etwa 50 Lux ansetzen, woraus sich seine Flächenhelle e mit Hilfe der Gleichung $e = \frac{M \cdot E^*}{10000 \cdot \pi}$ (in welcher man die Albedo M zu etwa 0,7 ansetzen kann) zu

$$e \sim \frac{1}{1000} \text{ HK/cm}^2$$

ergibt. Der Wirkungsgrad beträgt bei der Balmainischen Leuchtfarbe etwa 10 Proz.²⁷⁾.

Außer von der Art des Zinksulfids und der erregenden Lichtquelle wird die Intensität naturgemäß noch von der Schichtdicke abhängen. Nach Messungen von Lenard¹⁰⁾ ist jene bei einem Ca-Bi-Phosphor bei kleiner Schichtdicke (bis zu 0,14 mm) dieser proportional, auch das Phosphoreszenzlicht strahlt hierbei noch merklich ungeschwächt nach außen. Mit zunehmender Dicke wächst die Intensität langsamer, um schließlich konstant zu bleiben; dabei gilt 1 mm praktisch schon als unendlich dicke Schicht. Bei dieser ist die Erregung 5,7 mal stärker als bei einer Schichtdicke von 0,01 mm (naturgemäß hängen diese Zahlenangaben noch von der Körnung des Phosphors und seiner Zusammenpressung ab). Das emittierte Licht geht selbst durch Schichten von 0,4 mm noch merklich hindurch, so daß die Absorption hauptsächlich für das erregende, nicht für das emittierte Licht erfolgt.

Aus der verhältnismäßig geringen Helligkeit der Phosphore folgt, daß sie als Lichtquellen nur für das gut dunkel adaptierte Auge, also zum Gebrauch im dunkeln oder verdunkelten Raume bzw. im Freien nur nachts Verwendung finden können. Man hat sie deshalb benutzt zur Kenntlichmachung von Klingelknöpfen, Schaltern u. ä., indem man um diese einen Ring aus phosphoreszierender Substanz herumlegte, ferner bei Waldwegen und allgemein zur Wegmarkierung. Vereinzelt sind sie auch für Marschkompass (s. 6. Kap.), Sensitometer und im Dunkeln leuchtende Photographien benutzt. Ihre allgemeine Verwendung scheiterte aber daran, daß sie immer einer vorhergehenden Bestrahlung bedürfen, was bei in der Tasche getragenen Instrumenten (wie beim Kompaß) leicht vergessen werden kann, und ferner an dem Umstande, daß ein großer Teil ihres Lichtes momentan abklingt. Selbst bei längere Zeit leuchtenden Substanzen ist aber auch das (an sich schon schwache) Dauerleuchten in zwei Stunden so weit verringert, daß es für die Wahrnehmung im allgemeinen nicht mehr ausreicht. An eine Erkennung während langer Winternächte ist also gar nicht

*) Siehe 3. Kapitel, b).

zu denken. In den (für diese Zeiten) dauernd gleichmäßig leuchtenden radioaktiven Leuchtfarben und ihrer Unabhängigkeit von jeder vorhergehenden Bestrahlung liegt ihr prinzipieller Vorteil gegenüber den gewöhnlichen Phosphoren.

Erwähnt sei noch, daß nach unseren Versuchen das Zinksulfid am diffusen Tageslicht schon nach 24 Stunden, bei direkter Sonnenbestrahlung noch schneller, namentlich unter dem Einfluß ultravioletter, violetter und blauer Strahlen eine Verringerung der Phosphoreszenzfähigkeit erleidet (und gleichzeitig eine blaugraue Färbung annimmt). Das macht sich besonders bei dem anfänglich schnellen Abfall bemerkbar, während das Dauerleuchten nicht wesentlich dadurch beeinträchtigt wird. Bei Aufbewahrung im Dunkeln geht die Veränderung, wenn auch nur sehr langsam, wieder zurück. Es scheinen also besonders die Momentanzentren durch die Lichtbestrahlung vorübergehend zerstört zu werden.

2. Kapitel.

Radioaktivität*).

a) Zerfallstheorie.

Als radioaktiv bezeichnet man diejenigen chemischen Elemente, deren Atome spontan unter Aussendung von Strahlen zerfallen und in ein neues chemisches Element übergehen. Ihre Strahlung ist durch keinerlei äußere Eingriffe (Konzentration, Temperatur, Druck, Bestrahlung, elektrische oder magnetische Einwirkung usw.) zu beeinflussen. Die radioaktiven Strahlen ionisieren die Luft (und können dadurch gemessen werden), erregen eine Reihe von Körpern zur Lumineszenz, verursachen chemische Umsetzungen (wirken z. B. auf die photographische Platte ein) und üben auch bestimmte physiologische Effekte aus. Im Magnetfelde spalten sie sich in drei deutlich voneinander getrennte Gruppen von auch sehr ver-

*) Wegen einer ausführlichen Darstellung der Radioaktivität sei auf die in der Literatur angeführten Lehrbücher 1) bis 4) verwiesen. Hier soll dieselbe nur so weit behandelt werden, wie es zum Verständnis der bei den radioaktiven Leuchtfarben auftretenden Erscheinungen notwendig ist.

schiedener Absorptionsfähigkeit, die man nach Rutherford als α -, β - und γ -Strahlen bezeichnet. Die α -Strahlen werden wie ein positiver Strom abgelenkt und bestehen aus Heliumatomen, welche eine positive Ladung mit sich führen, die gleich dem doppelten Elementarquantum ist; sie entsprechen also den Heliumkanalstrahlen und machen etwa 99 Proz. der Strahlung aus. Auch die β -Strahlen sind Korpuskularstrahlen, werden aber, im Gegensatz zu den positiven α -Teilchen, aus negativen Elektronen gebildet, d. h. aus freien, nicht an die Materie gebundenen elektrischen Elementarquanten, deren Masse gleich $\frac{1}{1840}$ des Wasserstoffatoms ist; ihre spezifische Ladung (Ladung/Masse) beträgt $4,77 \cdot 10^{-10}$ elst. oder $1,59 \cdot 10^{-20}$ elm. E. Sie entsprechen also den Kathodenstrahlen, tragen aber weniger als 1 Proz. zur Gesamtstrahlung bei. Die γ -Strahlen sind im Gegensatz zu den beiden anderen keine Korpuskularstrahlen, sondern sehr schnelle Ätherschwingungen und unterscheiden sich von den ihnen verwandten Röntgenstrahlen nur durch ihre größere Schwingungszahl.

Die Wellenlänge der γ -Strahlen des Radiums C beträgt nur etwa $0,01 \mu\mu$, während die der charakteristischen K -Strahlung des Silbers und Aluminiums $0,056$ bzw. $0,836 \mu\mu$ ist (zum Vergleich sei die Wellenlänge der D -Linien des Natriums mit $596 \mu\mu$ angegeben).

Danach ist das radioaktive Atom *) kein einfaches, sondern ein höchst kompliziertes Gebilde, das sich aus einfacheren Bestandteilen, zum mindesten Heliumatomen und Elektronen, aufbaut und im Gegensatz zu den gewöhnlichen Atomen instabil ist. Dies wird in ganz besonderem Grade für die sich aus vielen einzelnen Bausteinen zusammensetzenden Atome, also für die Elemente von hohem Atomgewicht, Uran (Atomgewicht 238) und Thor (Atomgewicht 232) gelten, an denen beiden auch zuerst die Radioaktivität entdeckt wurde **). Nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung wird sich nun immer ein bestimmter Teil ihrer Atome unter explosionsartiger Ausscheidung der Elementarbestandteile in eine stabilere Anordnung mit anderen physikalischen und chemischen Eigenschaften umsetzen. Die so gebildeten neuen Atome brauchen nun ihrerseits durchaus nicht stabil zu sein, sondern können sich in eine aufeinander folgende Reihe von mehr oder

) Eine recht gute Erklärung der radioaktiven und anderer Erscheinungen gestattet vor allem das Atommodell von Rutherford), besonders auch in seiner Fortentwicklung durch Bohr.

***) H. Becquerel 1896 beim Uran, G. C. Schmidt und wenige Tage später Frau Curie 1898 am Thor.

minder instabilen Atomen bis zu einem stabilen Endprodukt umwandeln.

So bilden sich aus dem Uran nacheinander die in der Tabelle I *) untereinander aufgeführten radioaktiven Elemente: $U X_1$, $U X_2$, $U II$, Ionium, Radium, Ra Emanation, Ra A, B, C, C', D, E, F, deren letztes sich in das inaktive stabile Blei umwandelt. Eine solche Reihenfolge von auseinander entstehenden Elementen bezeichnet man als eine radioaktive Gruppe oder Familie. Die U-Familie setzt sich also aus 14 Gliedern zusammen; von diesen sind bisher in größeren Mengen dargestellt und deshalb auch näher untersucht das Io, das Ra, seine Em und das Ra F (oder Polonium), während die übrigen neun Zwischenglieder nur durch ihre radioaktiven Eigenschaften erkannt und (wie wir später sehen werden) auch charakterisiert sind. In ähnlicher Weise wird die Thor-Familie von den auseinander entstehenden Elementen Th, Mesothor₁, MsTh₂, Radiothor, Th X, Th Em, Th A, B, C, C' und D gebildet. Ihre weitere Fortsetzung ist bisher nicht direkt beobachtet, doch entsteht schließlich auch ein inaktives stabiles Element, und zwar wiederum das Blei (Th D). In größeren Mengen lassen sich MsTh und RdTh darstellen. Da das Helium das Atomgewicht 4 hat, so muß sich das Atomgewicht bei der Aussendung eines α -Teilchens um vier Einheiten verringern, während es bei der β -Strahlung unverändert bleibt. Auf Grund dieser Regel ergeben sich für die wichtigsten radioaktiven Elemente die folgenden Atomgewichte: Ra 226, Ra Em 222, Ra F 210, Ms Th und Rd Th 228.

Während im allgemeinen aus jedem radioaktiven Element nur ein neues entsteht, tritt in gewissen Fällen noch eine Seitenverzweigung auf, so daß sich dann gleichzeitig zwei Elemente nebeneinander bilden. Die wichtigste ist der duale Zerfall des U II in Io (aus dem dann weiterhin die Ra-Reihe entsteht), und das U Y, aus welchem über das Proto-Actinium das Ac sich ableitet ¹²⁾. Aus diesem bildet sich über bisher nicht bekannte Zwischenglieder hinweg das Rd Ac, Ac X, die Ac Em und die Glieder Ac A bis D. An dieser Stelle reißt wiederum unsere Kenntnis ab, doch ist in Analogie zu den anderen Familien zu erwarten, daß auch das stabile Endprodukt dieser Reihe das Blei sein wird. Bisher ist auch nicht bekannt, in welchem Verhältnis sich das U II in Io und U Y spaltet. Ähnliche Seitenverzweigungen

*) Tabelle I befindet sich am Schluß des Buches.

beobachtet man auch bei den C-Gliedern der drei Reihen, aus denen bei ihrem β -Zerfall die (selbst α -strahlenden) C' Elemente und daneben durch jener α -Zerfall die Seitenglieder C'' entstehen, über deren Umwandlung bisher weiter nichts bekannt ist. Da ihre Mengen 0,03 Proz. beim Ra, 99,85 Proz. beim Ac und 35 Proz. beim Th betragen, kann man die α -Strahlung von Ra C vernachlässigen, und die von Ra C' und Ac C mit 100 Proz. in Rechnung nehmen, während die von Th C nur mit 35 Proz. und von Th C' mit 65 Proz. anzusetzen ist*).

Diese von Rutherford und Soddy 1904 aufgestellte Zerfallstheorie²⁾ hat aber nicht nur gestattet, die früher unentwirrbare Menge von 37 neuen radioaktiven Elementen in eine genetische Ordnung zu bringen, sondern auch die Zusammenhänge, die zwischen den einzelnen bestehen, quantitativ zu entwickeln. Erfahrungsgemäß ist die Strahlung eines radioaktiven Präparates proportional seinem Gehalt an dem betreffenden radioaktiven Element, unabhängig von seinem physikalischen und chemischen Zustande. Die Strahlung eines einheitlichen radioaktiven Elementes, dessen sämtliche Atome als gleichartig zu betrachten sind (und die etwa durch die von ihr hervorgerufene Ionisation gemessen werden kann), nimmt nun, wie die Erfahrung lehrt, nach einem Exponentialgesetz mit der Zeit ab. Bezeichnet man die Strahlung zur Zeit t mit J_t und zur Zeit $t = 0$ mit J_0 , so gilt das Gesetz

$$J_t = J_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

wo $e = 2,71828 \dots$ die Basis der natürlichen Logarithmen und λ eine für das betreffende Element charakteristische Konstante, die Zerfallskonstante, ist. Da nun die Strahlung proportional der in der Zeiteinheit zerfallenden Zahl von Atomen, also proportional der Größe dn/dt ist (falls n die zur Zeit t vorhandene Zahl von Atomen bedeutet), so ist auch

$$dn/dt = A e^{-\lambda t}$$

(A ein Proportionalitätsfaktor.) Durch Integration ergibt sich aus dieser

$$n = N \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

*) Außer den in der U- und der Th-Reihe enthaltenen radioaktiven Substanzen haben sich von den übrigen Elementen nur noch Rubidium und Kalium als radioaktiv erwiesen, und zwar senden sie β -Strahlen von sehr geringer Geschwindigkeit aus. Ihre Radioaktivität hängt wahrscheinlich damit zusammen, daß sie von allen Substanzen das größte Atomvolumen besitzen und damit auch im gewissen Grade instabil sind.

falls N die zur Zeit $t = 0$ vorhandene Zahl von Atomen ist. Die Bedeutung von λ erkennt man, wenn man die obige Gleichung differenziert; dann ist

$$d n/d t = \lambda N e^{-\lambda t} = - \lambda . n. \quad (2)$$

λ ist somit der in 1 Sek. zerfallende Bruchteil der noch vorhandenen Atome (wobei allerdings vorausgesetzt werden muß, daß λ klein gegenüber der Zeit von 1 Sek. ist). Der Wert für Ra

$$\lambda = 1,26, 10^{-11} . \text{sek}^{-1}$$

bedeutet also, daß von 10^{11} Atomen 1,26 und von 1 g Ra mit $6,07 \cdot 10^{23}/226 = 26,8 \cdot 10^{20}$ Atomen

$$26,8 \cdot 10^{20} \cdot 1,26 \cdot 10^{-11} = 3,4 \cdot 10^{10}$$

Atome in jeder Sekunde zerfallen.

Wie man aus Gleichung (1) ersieht, gibt die Größe $\Theta = 1/\lambda$ diejenige Zeit, in welcher die Anzahl der Atome auf $1/e$ ($= 0,36788$) des Anfangswertes gefallen ist; Θ ist die mittlere Lebensdauer der radioaktiven Substanz. Statt dieser benutzt man vielfach die Halbwertszeit T und versteht darunter diejenige Zeit, in welcher die anfängliche Atomzahl auf den halben Wert gesunken ist. Sie ergibt sich aus Gleichung (1) zu

$$\frac{1}{2} \cdot N = N \cdot e^{-\lambda T}$$

oder

$$T = - \frac{\ln \frac{1}{2}}{\lambda} = \frac{0,693 15}{\lambda} .$$

Für Radium würde sich daraus die Halbwertszeit zu $T = 1733$ Jahren berechnen. Es verringert sich somit die Menge einer radioaktiven Substanz in T Jahren auf die Hälfte, in $2 T$ Jahren auf $1/4$, in $3 T$ Jahren auf $1/8$, also in $x \cdot T$ Jahren auf $1/2^x$; in $10 T$ Jahren würde sie somit auf $1/2^{10} = 1/1024$, also rund $1/1000$ gesunken sein. Wie λ sind auch Θ und T unabhängig von allen äußeren Einflüssen und Eingriffen, so daß jede dieser drei (in der Tabelle I aufgeführten) Konstanten für die einzelnen radioaktiven Elemente charakteristisch ist. Zwischen ihnen besteht die Beziehung

$$\lambda = 1/\Theta = 0,693 15/T.$$

Die Gleichungen (1) und (2) gestatten nun auch, die Menge der Atome zu berechnen, welche sich durch den Zerfall einer Ausgangssubstanz für die einzelnen nacheinander entstehenden Glieder einer Reihe bilden. Zur Zeit $t = 0$ seien von der Primärsubstanz (mit der Zerfallskonstanten λ_1) N_1 Atome, von der sich

bildenden Substanz 2 (mit der Zerfallskonstanten λ_2) N_2 Atome vorhanden; ihre zur Zeit t vorhandenen Anzahlen seien n_1 und n_2 . Da die Substanz 1 in jeder Sekunde nach Gleichung (2) $\lambda_1 \cdot N_1 e^{-\lambda_1 t}$ Atome liefert und von der Substanz 2 $\lambda_2 \cdot n_2$ Atome zerfallen, so gilt die Gleichung

$$dn/dt = \lambda_1 \cdot N_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 \cdot n_2.$$

Durch Integration derselben folgt

$$n_2 = N_2 \cdot e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (3)$$

Es zerfällt also die anfänglich vorhandene Menge N_2 , wie nicht anders zu erwarten war, unabhängig für sich; dazu kommt die durch das zweite Glied der Gleichung angegebene Zahl von Atomen, welche durch den Zerfall der Primärsubstanz entstehen, hinzu.

Die Gleichung (3) möge zunächst auf einige Spezialfälle angewandt werden.

1. Es sei die Primärsubstanz langlebig im Vergleich zu dem Folgeprodukt (also λ_1 sehr klein gegenüber λ_2), so daß sie während der betrachteten Zeit als konstant angesehen werden kann (das gilt z. B. für die Bildung der Ra Em aus Ra); dann kann man das Glied $e^{-\lambda_1 t} = 1$ und $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$ setzen, und es wird

$$n_2 = N_2 \cdot e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}).$$

Ist noch zur Zeit $t = 0$ die Primärsubstanz allein vorhanden, also $N_2 = 0$, so wird

$$n_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}).$$

Da für $t = \infty$ $n_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N$ ($= N_\infty$) ist, so wird

$$n_2 = N_\infty \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (4)$$

Die Größe $N_\infty = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1$ bedeutet diejenige Menge, welcher sich n_2 asymptotisch nähert, und ist die Dauergleichgewichtsmenge der Substanz 2 (im Verhältnis zur Primärsubstanz), da sie dauernd so lange erhalten bleibt, als man den Zerfall der Primärsubstanz vernachlässigen kann; es wird nämlich ihr eigener Zerfall hierbei gerade durch die Nachlieferung von der Primärsubstanz kompensiert. Bezeichnet man allgemein die miteinander im Gleichgewicht

stehenden Atomzahlen der aufeinander folgenden Substanzen mit Z_1, Z_2, Z_3, \dots , so gilt also für diese die Gleichgewichtsbeziehung

$$\lambda_1 \cdot Z_1 = \lambda_2 \cdot Z_2 = \lambda_3 \cdot Z_3 = \dots \quad (5)$$

Im radioaktiven Gleichgewicht sind also die Zahlen der in 1 Sek. zerfallenden Atome für alle Glieder einer Familie dieselben und verhalten sich die Atomzahlen umgekehrt wie die Zerfallskonstanten oder direkt wie die Halbwertzeiten bzw. Lebensdauern. Die Gewichtsmengen erhält man aus diesen, wenn man noch mit dem Verhältnis der Atomgewichte multipliziert. Danach verhalten sich die Atomzahlen von Ra und U im Gleichgewicht wie

$$1 : \frac{5 \cdot 10^9}{1733} = 1 : 2,9 \cdot 10^6,$$

und ihre Gewichtsmengen wie

$$1 : 2,9 \cdot 10^6 \cdot \frac{238}{226} = 1 : 3,03 \cdot 10^6.$$

Es würde also 3030 kg Uran 1 g Ra oder 1 Tonne Uran 330 mg Ra im Gleichgewichte enthalten.

Aus der Gleichung (4) lassen sich die Zeiten τ_{10} und τ_1 berechnen, in welchen sich die Gleichgewichtsmenge bis auf 10 Proz. bzw. 1 Proz. angesammelt hat. Es wird dann $0,9 = 1 - e^{-\lambda_2 \tau_{10}}$ oder

$$\tau_{10} = \frac{\ln 10}{\lambda_2} = \frac{2,3026}{\lambda_2}$$

und

$$\tau_1 = 4,6052/\lambda_2. \quad (6)$$

Die Zeiten $\tau_{0,1}$ und $\tau_{0,01}$ bis zur Erreichung des Endwertes bis auf $1/10$ Proz. bzw. $1/100$ Proz. sind gleich 3 bzw. 4 $\cdot \tau_{10}$. Für Ra Em würden sich dabei folgende Werte ergeben:

$$\tau_{10} = 12,8; \quad \tau_1 = 25,6; \quad \tau_{0,1} = 38,4, \quad \tau_{0,01} = 51,2 \text{ Tage.}$$

Wären zur Zeit $t = 0$ N_∞ Atome der Substanz 2 vorhanden, so würden sie nach dem Gesetz

$$n = N_\infty \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

zerfallen. Trägt man in einem Koordinatensystem als Abszissen die Zeiten t und als Ordinaten die Zahlen n bzw. die der neu gebildeten Atome nach Gleichung (4) auf, so erhält man zwei spiegelbildähnlich zueinander verlaufende Kurven, deren Ordinaten sich an jeder Stelle zum Wert 1 ergänzen, so daß also der Anstieg komplementär zum Abfall verläuft.

2. Es sei in der allgemeinen Gleichung (3) der Fall angenommen, daß $N_2 = 0$ ist, dann ist

$$n_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (7)$$

Die Zeit t_{max} , für welche die Atomzahl der Substanz 2 ihren Höchstwert erreicht, erhält man aus dieser, wenn man $d n_2 / d t = 0$ setzt. Dann ergibt sich

$$t_{max} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \ln \lambda_1 / \lambda_2. \quad (8)$$

Bei der Bildung des Rd Th aus dem Ms Th würde sich ergeben

$$t_{max} = \frac{1}{86400 \cdot 365 (4,0 \cdot 10^{-9} - 1,09 \cdot 10^{-8})} \cdot \ln \frac{4,0 \cdot 10^{-9}}{1,9 \cdot 10^{-8}} = 4,58 \text{ Jahre.}$$

Ist die Primärsubstanz langlebiger als die aus ihr gebildete, so nähert sich diese asymptotisch dem Wert

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1 e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot n_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot n_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot n_\infty.$$

Dabei bedeutet n_∞ diejenige Gleichgewichtsmenge der Substanz 2, welche sich ansammeln würde, wenn die Substanz 1 dauernd auf dem Wert n_1 erhalten würde (also die Dauergleichgewichtsmenge). Im Gegensatz dazu bezeichnet man die Größe

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot n_\infty$$

als laufende Gleichgewichtsmenge (sie ist, wie sich sofort ergibt, stets größer als die Dauergleichgewichtsmenge n_∞).

Zerfällt die neu gebildete Substanz sehr schnell (ist also λ_2 sehr groß gegenüber λ_1 , so daß man $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$ setzen kann), so geht Gleichung (7) nach kurzer Zeit über in

$$n_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1 \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

und der Abfall der zweiten Substanz geschieht einfach exponentiell mit der Zerfallskonstanten der Primärsubstanz. Abgesehen von der sehr kurzen Anfangszeit kann man also annehmen, daß beide als eine einheitliche Substanz abklingen; dieser Fall liegt z. B. vor beim Ms Th₁ und Ms Th₂. —

In ähnlicher Weise kann man auch die Bildung eines späteren Folgeproduktes berechnen, doch soll hier die allgemeine Ableitung

dafür nicht gegeben *), sondern nur das Ergebnis mitgeteilt werden, wobei vorausgesetzt ist, daß zur Zeit $t = 0$ nur die Primärschubstanz (mit N Atomen) vorhanden gewesen ist, während die Mengen aller übrigen Substanzen gleich 0 waren. Bezeichnet man die zur Zeit t gebildete Menge der i ten Substanz mit n , so ist

$$n = N \cdot \left. \begin{aligned} &A \cdot e^{-\lambda_1 t} + B \cdot e^{-\lambda_2 t} + C \cdot e^{-\lambda_3 t} + D \cdot e^{-\lambda_4 t} \\ &+ E \cdot e^{-\lambda_5 t} + \dots + J \cdot e^{-\lambda_i t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

worin die Faktoren A, B, C, \dots die folgende Bedeutung haben:

$$A = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_5 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1) \cdot (\lambda_4 - \lambda_1) \cdot (\lambda_5 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)}$$

$$B = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_5 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2) \cdot (\lambda_4 - \lambda_2) \cdot (\lambda_5 - \lambda_2) \dots (\lambda_i - \lambda_2)}$$

$$C = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_5 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_3) \cdot (\lambda_2 - \lambda_3) \cdot (\lambda_4 - \lambda_3) \cdot (\lambda_5 - \lambda_3) \dots (\lambda_i - \lambda_3)}$$

$$D = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_5 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_4) \cdot (\lambda_2 - \lambda_4) \cdot (\lambda_3 - \lambda_4) \cdot (\lambda_5 - \lambda_4) \dots (\lambda_i - \lambda_4)}$$

$$E = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_5 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_5) \cdot (\lambda_2 - \lambda_5) \cdot (\lambda_3 - \lambda_5) \cdot (\lambda_4 - \lambda_5) \dots (\lambda_i - \lambda_5)}$$

.....

Hieraus kann man jeden einzelnen Fall entnehmen. Handelt es sich z. B. um das fünfte Folgeprodukt, so hat man den Zähler mit dem Faktor λ_4 abzurechnen und im Nenner nur diejenigen Werte zu berücksichtigen, welche noch λ_5 enthalten. Man sieht dann z. B. leicht, daß sich auch die Gleichung (7) auf diese Weise aus der allgemeinen Gleichung (9) ergibt.

b) Die radioaktiven Familien.

1. Isotope.

Nach der Entdeckung der neuen 37 Radioelemente, die, soweit sie nicht in wägbarer Menge hergestellt und näher untersucht werden konnten, durch ihre Zerfallskonstante und die von ihnen ausgesandten Strahlen charakterisiert sind, machte es zunächst große Schwierigkeiten, sie in das periodische System der Elemente einzuordnen. Dies gelang erst auf Grund der von Fajans und

*) Man findet sie bei P. Gruner, Ann. d. Phys. 19, 169, 1906 und Arch. sc. phys. et nat. (4) 23, 329, 1907.

Soddy aufgestellten Regel³⁾, daß bei Verlust eines α -Teilchens das neu entstandene Element im periodischen System um zwei Stellen nach links, bei Entstehung aus einem β -strahlenden dagegen um eine Stelle nach rechts rückt. Führt man diese Regel ausgehend vom U und Th, deren Stellung ja bekannt ist, durch, so zeigt sich, daß mehrere Elemente auf dieselbe Stelle des periodischen Systems fallen. Es ergeben sich dabei die folgenden 10 als Plejaden bezeichneten Gruppen von Elementen, die im periodischen System zusammen gehören:

Uran I, U II.

Thor, Rd Th, Io, U X₁, U Y, Rd Act.

Wismut, Ra E, Ra C, Th C, Ac C.

Blei, Ra B, Th B, Ac B und die inaktiven Endprodukte der drei radioaktiven Familien.

Thallium, Ra C'', Th C'', Ac C''.

Ra F, Ra A, Th A, Ac A, Ra C', Th C', Ac C'.

Ra Em, Th Em, Ac Em.

Ra, Ms Th₁, Th X, Ac X.

Ac, Ms Th₂.

U X₂.

Alle innerhalb derselben Gruppe gelegenen Elemente haben trotz ihrer bis zu acht Einheiten verschiedenen Atomgewichte dieselben chemischen und physikalischen Eigenschaften und können bisher durch kein Mittel voneinander getrennt oder unterschieden werden, sie verhalten sich also im Gemisch völlig wie ein einheitliches chemisches Element. Die einzelnen chemisch und physikalisch sich ersetzenden Elemente einer Gruppe bezeichnet man als Isotope. Andererseits gehören Elemente mit demselben Atomgewicht (wie U X₁, U X₂, U₂) in verschiedene Plejaden und unterscheiden sich auch in ihrem physikalischen und chemischen Verhalten. Diese unsere bisherigen Begriffe über das chemische Element völlig auf den Kopf stellende Theorie hat dadurch eine glänzende Bestätigung gefunden, daß es Hönigschmidt³⁾ gelang, einen experimentellen Beweis dafür zu liefern. In reinen U- bzw. Th-Mineralien muß sich im Laufe geologischer Zeiträume das stabile Endprodukt der beiden radioaktiven Familien, das Blei, ansammeln, und zwar müßte das Uran-Blei das Atomgewicht 206, das Thor-Blei dagegen 208 haben, während das gewöhnliche Blei ein solches von 207,1 aufweist. Seine sehr sorgfältigen Untersuchungen bestätigen die theoretischen erwartenden Atomgewichte

der beiden Bleisorten und zeigten weiter, daß sie sich in keiner Hinsicht, auch nicht spektralanalytisch, von dem gewöhnlichen Blei unterscheiden; dieses wäre somit als Gemisch von Uran- und Thor-Blei aufzufassen.

2. Die Uranreihe.

Das Uran als chemisches Element ist seit langem bekannt; seine Radioaktivität ist — entsprechend seiner großen Lebensdauer — nur schwach, etwa 10^6 mal kleiner als die des Ra. Da U II isotop mit U I ist, so lassen sich beide nicht voneinander trennen. Die zwischen ihnen liegenden Glieder der Reihe, das UX_1 und UX_2 , sind feste Körper, die wegen ihrer kurzen Lebensdauer keine größere Bedeutung haben. Das U ist nun aber insofern wichtig, als aus ihm (über das Io) das Ra entsteht. Beide sind somit in allen primären Uranmineralien vorhanden, vor allem der Pechblende, welche 75 bis 88 Proz. Uranoxyd enthält [Fundorte: Joachimstal in Böhmen; Bezirk Morogoro in Deutsch-Ostafrika; Gilpin County (Colorado) in den Vereinigten Staaten von Amerika], dann in Carnotit (Fundorte: Colorado, Utah und Pennsylvanien in den Vereinigten Staaten) und im Uranglimmer mit 50 Proz. Uran [Fundort: Portugal]*).

Da das Io isotop mit Th ist, so scheidet es sich mit diesem zusammen aus und kann nicht von ihm isoliert werden, so daß es nur aus thorfreien U-Mineralien rein dargestellt werden kann. In seinem ganzen sonstigen Verhalten — abgesehen von seiner Radioaktivität — ist es vom Th nicht zu unterscheiden. Aus dem Verhältnis des Zerfallskonstanten berechnet sich, daß 1 Tonne Uran etwa 20 g Io liefert, seine Aktivität ist aber immer noch 59 mal kleiner als die des Ra. Wegen seiner großen Lebensdauer ist ferner eine merkliche Anreicherung des Io an Ra innerhalb mehrerer Jahre oder Jahrzehnte nicht zu erwarten.

Das Ra ist von dem Ehepaar Curie 1898 zuerst aus U-Mineralien durch komplizierte chemische Verfahren²⁾ abgeschieden und später auch rein dargestellt worden, und zwar wird es gewöhnlich als Chlorid, Bromid, Sulfat oder Carbonat gewonnen. Es ist das einzige neue radioaktive Element, das bisher in genügenden Mengen (insgesamt etwa 50 g) hergestellt worden ist, so daß man es näher hat untersuchen können. Da 1 Tonne U im radioaktiven Gleich-

*) Außerdem findet sich Ra in sehr feiner Verteilung im Erdboden (im Mittel 2. 10^{-12} g Ra/g Gestein) und im Meerwasser (Mittel 10^{-15} g Ra/g Wasser), ferner in einigen Heilquellen.

gewicht 330 mg Ra enthält, so können aus 1 Tonne Erz mit einem Gehalt von 75 Proz. Uranoxyd (entsprechend 68 Proz. U) etwa 234 mg Ra gewonnen werden, doch ist die praktische Ausbeute um 10 bis 20 Proz. geringer, da es in starker Verdünnung in die ungeheuren Mengen von Säuren und Waschwasser eingeht, welche bei der Verarbeitung der riesigen Mengen von Ausgangsmaterial gebraucht werden. Da Ra mit dem Ac X Isotop ist, bleibt dieses mit ihm vereinigt, doch ist es nach Gleichung (6) nach $2\frac{1}{2}$ Monaten völlig verschwunden. Das Ra gehört zur Klasse der Erdalkalien und verhält sich in allen seinen chemischen Eigenschaften wie das Barium, mit dem es zusammen aus den Mineralien ausfällt; es ist aber nicht isotop mit ihm und läßt sich durch fraktionierte Kristallisation von ihm trennen; sein Chlorid und Bromid sind nämlich etwas schwerer löslich wie die entsprechenden Bariumsalze. Da aber die letzte Reinigung außerordentlich schwer ist, so kommt es meist als Barium-Radiumsalz mit einem Gehalt von 20 bis 40 Proz., in hoch konzentrierter Form von 50 bis 60 Proz. Ra met. in den Handel. Wie das Bariumsulfat ist auch das Radiumsulfat praktisch in Wasser unlöslich. Das Atomgewicht des Ra ist experimentell von Hönigschmidt³⁾ zu 225,95 bestimmt; es hat ferner ein eigenes Spektrum und färbt die Flamme karminrot. Die frisch hergestellten Radiumsalze sind rein weiß, färben sich aber allmählich infolge der Zersetzung durch die radioaktiven Strahlen braun bis schwarz.

Da die Radioaktivität eine Eigenschaft des Ra-Atoms ist, so ist das Wirksame in jedem Präparat nur sein Gehalt an Ra-Metall. Leider hat sich zum Teil noch die Unsitte gehalten, den Verkauf nach der Gewichtsmenge Salz vorzunehmen. Zur Umrechnung sei angegeben, daß enthalten:

1 g Ra Cl ₂	761 mg Ra met.,
1 g Ra Br ₂	586 „ „ „
1 g Ra Br ₂ kristallisiert (mit 2 Mol. Wasser)	536 „ „ „
1 g Ra CO ₃	790 „ „ „
1 g Ra SO ₄	702 „ „ „

Aus dem Ra entwickelt sich fortwährend ein radioaktives Gas, die Ra Em, welche zur Klasse der Edelgase gehört; sie verhält sich völlig wie diese, besitzt ein eigenes Spektrum, löst sich in Wasser (bei 20° zu etwa 25 Proz.) und wird von vielen festen Körpern, wie Kautschuk, Celluloid, Wachs, Ton, Kohle und verschiedenen Metallen (besonders Platin, Palladium) okkludiert.

Bewahrt man das Ra in einem abgeschlossenen Raume auf, so sammelt sich die Em im Verlauf von etwa einem Monat bis zu ihrer Gleichgewichtsmenge an; bei jedem Umfüllen des Ra in ein anderes Gefäß entweicht aber ein Teil in die Luft, so daß man dann wiederum einen Monat bis zur Einstellung des Gleichgewichtes warten muß*). Ihre Abgabe hängt naturgemäß ab von der Natur des Salzes, seiner physikalischen Beschaffenheit (Pulverfeinheit, Schichtdicke, Trockenheit) und von der Temperatur; feste Salze okkludieren 65 bis 95 Proz. Em. Wegen der allgemeinen Verbreitung des Ra findet sie sich auch in vielen Heilquellen und ferner in der Luft, wohin sie durch den Austritt der Bodenluft aus den Erdporen bei der Bodenatmung gelangt.

Die Em zerfällt dann in vier aufeinander folgende kurzlebige Elemente, Ra A, B, C und ($C' + C''$), mit denen sie nach Gleichung (6) nach drei Stunden praktisch im Gleichgewicht ist. Da nur 0,3 Proz. C'' bei der Umwandlung des Ra C entstehen, so kann man dieses als einen einheitlich zerfallenden α -, β - und γ -Strahlen aussendenden Körper betrachten. Wegen der geringen Lebensdauern beträgt die Menge der Stoffe Ra A bis C nur etwa 10^{-8} g/g Ra, so daß sie nicht näher untersucht werden können. Sie schlagen sich vorzugsweise an negativ geladenen Körpern nieder (weshalb man sie als radioaktive Niederschläge bezeichnet), sind also feste Körper und können hier angesammelt werden. Durch Erwärmung auf etwa 650° lassen sie sich durch Sublimation abtrennen. Beim Zurückhalten der Em sammeln sie sich naturgemäß mit dieser im Ra-Präparat an; das ist außerordentlich wichtig, da damit die Zahl der vom Ra ausgesandten α -Teilchen vervierfacht wird, und da ferner das Ra C der einzige Körper in der Ra-Reihe ist, welcher durchdringende γ -Strahlen aussendet. Da nämlich die winzigen Mengen (kommen doch häufig 10^{-6} bis 10^{-10} mg in Frage) mit Hilfe der Wage nicht mehr festzustellen sind, und da andererseits die Strahlung proportional der Anzahl der Atome ist, so hat es sich allgemein eingebürgert, die Ra-Mengen durch die γ -Strahlung des Ra C zu bestimmen.

Aus dem Ra C'' bildet sich das mit dem Blei isotope Ra D, welches deshalb bei der Gewinnung des Ra mit jenem (und dem Ra F) ausfällt und von ihm nicht abtrennbar ist (es führte daher auch den Namen Radiumblei). 1 Tonne U enthält 2,6 mg Ra D; seine Gleichgewichtsmenge zu 1 g Ra beträgt 8 mg, sie wird aber nach Gleichung (6) erst nach 110 Jahren erreicht. Aus so alten

*) So stellten wir gelegentlich fest, daß beim Umfüllen eines Präparates 22,5 Proz. der Em entwichen waren.

Ra-Präparaten wäre es möglich, das Ra D (mit dem Ra F) frei von Blei abzuschneiden. Aus dem Ra D entsteht über das verhältnismäßig kurzlebige Ra E, das nach 50 Tagen mit ihm im Gleichgewicht ist, das Ra F oder Polonium, die erste radioaktive Substanz, welche von dem Ehepaar Curie 1898 dargestellt wurde. Es ähnelt in seinem chemischen Verhalten dem Wismut und noch mehr dem Thallium, ist aber nicht isotop mit ihnen; da es auch nicht isotop mit dem Blei ist, so kann man es aus den Uranerzen abgeschiedenen Bleimengen (die auch das Ra D enthalten) durch Elektrolyse gewinnen, und zwar enthält 1 Tonne U 0,066 mg Polonium, während 1 g Ra etwa 0,2 mg Ra F im Gleichgewicht liefert. Rein gewinnt man es aus alten Ra-Salzen, wie das Ra D, durch Fällen mit Schwefelwasserstoff oder durch Niederschlagen auf Wismut- oder Platinblechen, von welchen letzteren man es bei 1000° abdestillieren kann. Durch das Anwachsen des Poloniums wird sich die α -Strahlung eines Ra-Präparates im Laufe der Jahre etwas vermehren, doch ist ihr Betrag für die Zeit von einigen Jahren so gering, daß er vernachlässigt werden kann.

Da die einzelnen Stoffe der Ac-Reihe mit den entsprechenden Gliedern der Ra-Reihe völlig analog sind, wegen ihrer großen Seltenheit aber bisher keine praktische Verwendung gefunden haben, sollen sie hier nicht weiter behandelt werden.

3. Die Thorreihe.

Das Thor ist als chemisches Element bereits seit 1828 bekannt. Seine Aktivität, die 1898 von G. C. Schmidt und Frau Curie erkannt wurde, ist, wie man durch Vergleich der Lebensdauern von U und Th ersieht, noch geringer als die jenes Elementes. Die Gewinnung von Th hat seit der Entwicklung der Gasglühlicht-Industrie (im Jahre 1895), die zur Tränkung der Glühstrümpfe ein Gemisch von 99 Proz. Thoroxyd und 1 Proz. Ceroxyd braucht, einen gewaltigen Aufschwung genommen. Man kann die jährliche Thorerzeugung zu 10^5 kg ansetzen. Die wichtigsten Thormineralien sind der Monazitsand mit 1 bis 8 Proz. Thoroxyd (Fundorte: Brasilien, Nord- und Süd-Karolina in den Vereinigten Staaten) und der Thorianit mit 70 bis 80 Proz. Thoroxyd (Fundort: Ceylon). Die Thormineralien enthalten meist noch U, und zwar der Monazitsand 0,1 Proz., der Thorianit 9 bis 10 Proz. Uranoxyd *).

*) Außerdem findet sich das Th in sehr feiner Verteilung überall, und zwar beträgt der durchschnittliche Gehalt der Erdkruste $20 \cdot 10^{-6}$ g Th/g Gestein.

Aus dem Th entsteht zunächst ein fester Körper, das von O. Hahn 1907 entdeckte MsTh_1 mit einer Halbwertszeit von 5,5 Jahren; das radioaktive Gleichgewicht zwischen beiden würde somit nach Gleichung (6) nach 37 Jahren erreicht werden, so daß man das Th dann von neuem auf MsTh verarbeiten könnte. Dieses ist, abgesehen von den nur in geringer Menge dargestellten RaD , das langlebigste der nicht Jahrhunderte lang dauernden Elemente und hat deshalb auch neben dem Ra in der Medizin und in der Leuchtfarbenindustrie große Verwendung gefunden. Die Herstellung von MsTh ist damit zu einem wichtigen Nebenzweige der Glühstrumpffabrikation geworden. Da es isotop zum Ra ist, kann es nach analogen chemischen Methoden aus den Thormineralien gewonnen werden, wenn auch die einzelnen Fabriken ihre besonderen geheim gehaltenen Methoden haben. Vom Barium wird es wie das Ra durch fraktionierte Kristallisation getrennt und kommt meist als Chlorid oder Bromid in den Handel, die in ihren sonstigen physikalischen und chemischen Eigenschaften naturgemäß mit den entsprechenden Ra-Salzen identisch sind. Da die meisten Thormineralien Ra enthalten, so ist das technisch dargestellte MsTh stets mit einer gewissen Menge Ra (daneben auch mit den Isotopen ThX und AcX , die aber in $2\frac{1}{2}$ Monaten nach der Herstellung völlig verschwunden sind) versetzt.

Aus einer Jahresmenge von 10^5 kg Th würden sich nach Gleichung (5) jährlich

$$\frac{10^{11} \cdot 1,7 \cdot 10^{-18}}{4 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{228}{232} = 42 \text{ mg MsTh}_1$$

gewinnen lassen; es enthält also 1 Tonne Th 0,42 mg MsTh . Da es nun bei der Aufbewahrung zerfällt, so würde sich bei einer jährlichen Neugewinnung von 42 mg die überhaupt zu gewinnende maximale Menge zu

$$\frac{42}{4 \cdot 10^{-9} \cdot 86400 \cdot 365} = 332 \text{ mg}$$

ergeben. In der Praxis versteht man aber im Gegensatz zum Ra unter 1 g MsTh nicht das Gewicht, sondern diejenige Menge, welche dieselbe γ -Strahlung wie 1 g Ra liefert (s. auch 4. Kapitel).

Aus dem MsTh_2 entsteht das MsTh_3 , das bereits nach 41 Stunden im Gleichgewicht mit ihm ist, so daß von da ab beide als ein einheitlicher Körper zerfallen; dieses ist insofern wichtig, als es eine sehr durchdringende γ -Strahlung aussendet, so daß damit die Menge des MsTh bestimmt werden kann.

Aus dem MsTh bildet sich das dem Io in der Ra-Reihe entsprechende und mit ihm, sowie mit dem Th, isotope RdTh. Es kann rein also nur aus thorfreien Substanzen, etwa aus MsTh durch Fällung mit Ammoniak, oder elektrolytisch gewonnen werden. Bei seiner verhältnismäßig großen Halbwertszeit findet es auch zur Herstellung verschiedener Leuchtfarben Verwendung. Im Gleichgewicht enthält 1 Tonne Th 0,15 mg RdTh. Das folgende Glied der Thorfamilie, das ThX, entspricht dem Ra in der Ra-Reihe und ist mit ihm isotop, es ist nach Gleichung (6) nach 24 Tagen mit dem RdTh im Gleichgewicht und läßt sich aus dessen Salzen mit Ammoniak ausfällen. 1 g MsTh bzw. RdTh enthält 1,75 bzw. 5,44 mg ThX.

Der weitere Zerfall der Th-Reihe gestaltet sich nun völlig analog wie bei der Ra-Reihe. Da die einzelnen aufeinander folgenden Glieder Em, A, B, C, (C' + C''), D isotop mit den entsprechenden Ra-Zerfallsprodukten sind, so haben sie dieselben chemischen und physikalischen Eigenschaften wie jene und unterscheiden sich von ihnen nur durch ihre anderen Halbwertszeiten. Infolge der relativ großen Halbwertszeit von ThB dauert es 40 Stunden, ehe das Maximum der α - und γ -Strahlung erreicht ist*). Ein Unterschied tritt erst am Ende der Reihe auf, wo das ThD nicht mehr in ein aktives E-Produkt, sondern direkt in das stabile Blei übergeht.

Im Gegensatz zur Ra-Reihe treten aber in der Th-Familie zwei γ -Strahler (mit durchdringenden γ -Strahlen) auf, das MsTh₂ und das ThC (gegenüber dem einen RaC), was beim γ -Strahlenvergleich von Ra- und MsTh- bzw. RdTh-Präparaten zu beachten ist. Während ferner die Ra-Reihe (der kurzlebigen Zerfallsprodukte) nur vier α -Strahler aufweist, finden sich in einem im radioaktiven Gleichgewicht befindlichen MsTh-Präparate fünf mit der Aussendung von α -Strahlen verbundene Umwandlungen.

c) Die radioaktiven Strahlen.

Die α -Strahlen sind, wie schon vorher erwähnt, positiv geladene Heliumatome, welche von den einzelnen radioaktiven Substanzen bei ihrem Zerfall mit Geschwindigkeit von 1,37 bis $2,06 \cdot 10^9$ cm/sec ausgeschleudert werden. Sie haben die Eigenschaft, gewisse Körper, vor allem Diamant und Sidotblende, zum Leuchten zu erregen (also Radiolumineszenz hervorzurufen), und zwar erzeugt jedes

*) Es ist die laufende und nicht die Dauergleichgewichtsmenge zu nehmen, da der Zerfall des ThX während dieser Zeit nicht vernachlässigt werden darf.

einzelne α -Teilchen einen Lichtblitz. Diese Szintillationen haben es zuerst ermöglicht, die Zahl der von 1 g Ra (Element) ausgesandten α -Teilchen zu $3,4 \cdot 10^{10}/\text{sec}$ zu bestimmen. Da im Gleichgewicht jedes radioaktive Element dieselbe Zahl von Strahlen aussendet und die Ra-Familie bis zu dem verhältnismäßig langlebigen Ra D vier α -Strahler enthält, so sendet 1 g Ra im Gleichgewicht mit seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten $13,6 \cdot 10^{10}$ α -Teilchen/sec aus. Infolge der fortwährenden Abschleuderung von Heliumatomen erzeugt 1 g Ra im Jahre eine Menge von 156 mm^3 Helium. Bei sehr alten Ra-Präparaten, in welchen sich auch das Ra F bis zur Gleichgewichtsmenge angesammelt hat, würde jene Zahl $17,0 \cdot 10^{10}$ betragen. Da nach den Gesetzen des radioaktiven Gleichgewichtes mit 1 g Ra $\frac{10^5}{1733} \cdot \frac{230}{226} = 59 \text{ g Io}$ im Gleichgewicht sind, so sendet 1 g Io nur $5,8 \cdot 10^8$ α -Teilchen aus. In analoger Weise berechnet sich diese Zahl bei UI zu rund 10^4 , und für die untrennbaren UI und U II zusammen zu $2,3 \cdot 10^4$. Beim Th hat man einen Betrag von $4,5 \cdot 10^8$ α -Teilchen/sec ermittelt. Um dieselbe α -Strahlenmenge wie 1 g Ra met. zu erhalten, würde man also brauchen 59 g Io, 1500 kg UI + U II bzw. 8000 kg Th.

Auf ihrem Wege durch die Luft erleiden die α -Teilchen eine allmähliche Abnahme der Geschwindigkeit ohne Änderung ihrer Zahl. Jene fällt aber nicht nach einem Exponentialgesetz ab und nähert sich überhaupt nicht asymptotisch dem Werte 0; nach dem Durchlaufen eines bestimmten Weges, der Reichweite R , nach welchem die Geschwindigkeit auf einen bestimmten kritischen Wert von etwa $v = 8 \cdot 10^8 \text{ cm/sec}$ gesunken ist, hört vielmehr ihre ionisierende, Szintillations- und photographische Wirkung plötzlich auf. Mit großer Annäherung besteht zwischen v und R die Beziehung $v^3 = \alpha \cdot R$, wo α den Wert $1,33 \cdot 10^{27}$ hat. Die Reichweite ist in Gasen proportional der absoluten Temperatur und umgekehrt proportional dem Druck. Die für die einzelnen α -Strahlen bestimmten Werte R_{15} für Luft von Atmosphärendruck und 15^0 sind in Tabelle 1 angegeben; wie man aus dieser ersieht, liegen die Werte zwischen 2,50 und 8,60 cm. Die Zahlen sind für die einzelnen α -Strahler charakteristisch, da jedes radioaktive Element nur Strahlen mit einer ganz bestimmten Reichweite aussendet. Angenähert besteht nach Geiger und Nuttall³⁾ zwischen λ und R die Beziehung:

$$\log \lambda = A + B \log R,$$

in welcher A und B zwei Konstanten sind.

Für die Reichweiten in anderen Substanzen hat man früher angenommen, daß sie im Verhältnis der Dichte verringert seien. Bezeichnet man also Reichweite und Dichte für Luft mit R und S , für die betreffenden Substanzen mit r und s , so sollte das Gesetz gelten: $r = R \cdot S/s$. Diese Beziehung hat sich aber nicht als zutreffend erwiesen; besser stimmt, wenigstens bei Metallen, die

Gleichung $r = R \cdot \frac{S}{s} \cdot \sqrt{\frac{a}{A}}$, wo a und A die Atomgewichte der Sub-

stanz und von Luft ($A = 14,4$) sind. Danach würde sich die Reichweite der α -Strahlen von Th C' in Aluminium zu 0,05 mm und von Ra C' zu 0,04 mm berechnen, so daß also ein Aluminiumblech von $\frac{4}{100}$ mm Dicke die α -Strahlen des Ra schon völlig absorbiert. Bei chemischen Verbindungen ist an Stelle von \sqrt{a} der

Ausdruck $\frac{1}{n} \cdot \sum \sqrt{a_n}$ zu setzen, wo $a_1, a_2 \dots a_n$ die Atomgewichte der einzelnen in der Verbindung auftretenden Moleküle sind. In lockerem Zinksulfidpulver mit dem Raumgewicht 2,1 würde sich danach die Reichweite zu $6,9 \cdot 10^{-3}$ cm ergeben.

Die α -Strahlen sind in der Regel von langsam bewegten Elektronen (δ -Strahlen) begleitet, die als an den radioaktiven Substanzen erregte Sekundärstrahlen aufzufassen sind. Bei der Ausendung der α -Teilchen erleiden auch die hierbei entstehenden neuen Atome einen Rückstoß und bilden Rückstoßstrahlen. Da das Atomgewicht der α -Teilchen gleich 4, das der Rückstoßatome 206 bis 234 ist, so beträgt ihre Geschwindigkeit und auch ihre kinetische Energie nach dem Gesetz von der Erhaltung der Bewegungsgröße nur $\frac{1}{50}$ bis $\frac{1}{60}$, also etwa 2 Proz. von der der α -Teilchen, so daß sie diesen gegenüber in erster Annäherung zu vernachlässigen sind.

Treffen die α - (und ebenso die β - und γ -) Strahlen auf Gas-moleküle, so spalten sie von diesen ein Elektron ab, so daß der Molekülrest als positives Ion zurückbleibt. Bei Atmosphärendruck vermögen aber die Elektronen nicht frei zu existieren, sondern lagern sich sehr bald an irgend ein neutrales Molekül an und bilden mit diesem negative Ionen. Da unter sonst gleichen Umständen die Zahl der gebildeten Ionenpaare proportional der Intensität der Strahlung und damit der Menge der radioaktiven Substanz ist, so bildet die Bestimmung der Ionisierung durch Messung des in einem Gase unterhaltenen Sättigungsstromes (s. 3. Kapitel) die einzige quantitative und zugleich empfindliche Methode für radioaktive

Messungen. Die Zahl der von 1 α -Teilchen der verschiedenen radioaktiven Substanzen in Luft auf der ganzen Bahn erzeugten Ionenpaare (K) ist in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1.
Reichweite R_{15} und Zahl K der von 1 α -Teilchen erzeugten Ionenpaare.

Element	R_{15}	K
U I	2,50	1,20 . 10 ⁵
U II.	2,90	1,33 „
Io	3,07	1,38 „
Ra	3,30	1,45 „
Ra Em	4,16	1,69 „
Ra A	4,75	1,84 „
Ra C	(4) }	2,37 „
Ra C'	6,94 }	
Ra F	3,83	1,60 „
Th	2,72	1,26 „
Rd Th.	3,87	1,61 „
Th X	4,30	1,72 „
Th Em	5,00	1,90 „
Th A	5,70	2,08 „
Th C	4,95	1,89 „ (35 Proz.: 0,66 . 10 ⁵)
Th C'	8,60	2,73 „ (65 „ 1,78 . 10 ⁵)
Ac	3,56	1,52 „
Rd Ac	{4,61	1,80 „
	{4,2	
Ac X	4,26	1,72 „
Ac Em	5,57	2,05 „
Ac A	5,27	2,21 „
Ac C'	5,15	1,95 „

Die β -Strahlen bestehen aus schnell bewegten Elektronen (Geschwindigkeit 0,87 bis $2,96 \cdot 10^{10}$ cm/sec). Im Gegensatz zu den α -Strahlern senden aber die β -Strahler nicht homogene Strahlen, sondern Bündel solcher mit bestimmten verschiedenen Geschwindigkeiten aus. So beobachtet man bei der magnetischen Zerlegung der β -Strahlen des Ra B 16, beim RaC sogar 48 verschiedene β -Strahlen (magnetisches Spektrum). Auch sie vermögen bei einigen Substanzen, z. B. beim Bariumplatincyannür, Szintillationen zu erzeugen, kommen aber wegen ihrer etwa 100mal kleineren Energie

den α -Strahlen gegenüber für die Erregung der Radiolumineszenz weniger in Frage. Im Gegensatz zu den α -Strahlen erfolgt ihre Absorption nach einem Exponentialgesetz; fällt ein homogenes Parallel-Strahlenbündel der Intensität J_0 auf einen Körper, so hat es nach Durchsetzen einer Schicht der Dicke x nur noch die Intensität

$$J_x = J_0 \cdot e^{-\mu x},$$

wo μ eine vom Material abhängige Konstante, der Absorptionskoeffizient, ist. Entsprechend der mittleren Lebensdauer und der Halbwertszeit kann man auch hier die Begriffe der mittleren Reichweite $\vartheta = 1/\mu$ und der Halbierungsdicke

$$D = 0,69315/\mu$$

eingeführen. Für verschiedene Körper gilt mit großer Annäherung $\mu/s = \text{const}$, es ist also μ bei Gasen umgekehrt proportional dem Druck, während man für eine Verbindung vom Molekulargewicht M die Gleichung ansetzen kann:

$$\frac{\mu \cdot M}{s} = \sum \frac{\mu_n \cdot A_n}{s_n}.$$

Die Halbierungsdicke beträgt bei Aluminium für die durchdringenden β -Strahlen des RaB und C etwa 0,5 mm; durch 5 mm Aluminium oder 2 mm Blei werden sie vollständig absorbiert.

So wie die Röntgenstrahlen durch die plötzliche Bremsung der Kathodenstrahlen in der Antikathode der Röntgenröhre entstehen, liegt der Ursprung der (im Magnetfelde nicht ablenkbaren) γ -Strahlen in der positiven Beschleunigung, welche die β -Teilchen bei ihrer Ausschleuderung im Atom erfahren; diese sehr durchdringende Impulsstrahlung weist ein kontinuierliches Spektrum auf. Eine weitere Ursache ist die Verzögerung, welche die β -Strahlen beim Durchgang durch die den positiven Atomkern umgebende Elektronenhülle erfahren, wozu noch die dadurch ausgelösten Eigenschwingungen derselben kommen, welche das charakteristische (Linien-)Spektrum der radioaktiven Substanzen liefern. Für die Absorption homogener γ -Strahlen gelten im wesentlichen dieselben Gesetze wie für die β -Strahlen. Eine größere Durchdringungsfähigkeit besitzen von den uns hier vorzugsweise interessierenden Familien nur die γ -Strahlen des RaC, des MsTh₂ und des ThC, sie sind bei den üblichen Meßanordnungen zur Bestimmung der radioaktiven Substanzen durch die von ihren γ -Strahlen erregte Ionisation deshalb auch die allein wirksamen. Die Werte ihrer Absorptionskoeffizienten und Halbierungsdicken D für Aluminium

und Blei sind in Tabelle 2 angegeben (dabei ist indessen zu beachten, daß diese bis zum gewissen Grade von der Versuchsanordnung abhängen).

Tabelle 2.
Absorptionskoeffizient μ und Halbirungsdicke D
der γ -Strahlen.

Element	Aluminium		Blei	
	μ	D	μ	D
Ra C	0,115	6,03	0,495	1,40
Ms Th ₂	0,116	5,98	0,620	1,12
Th C	0,096	7,27	0,462	1,50

Danach würden die γ -Strahlen erst durch 75 cm Aluminium oder 20 cm Blei völlig absorbiert werden. In Luft beträgt die Halbirungsdicke 115 m, während eine Schicht von 760 m nötig ist, um ihre Intensität auf 1 Proz. zu verringern.

Bei der Absorption aller Strahlen wird ein Teil der absorbierten Energie wiederum in Strahlen (Sekundärstrahlen) verwandelt, eine Erscheinung, die in Analogie zu der teilweisen Umwandlung des Lichtes bei der Fluoreszenz in Licht von anderer Wellenlänge zu setzen ist. Die Sekundärstrahlen entstehen immer, wenn die radioaktiven Strahlen auf irgendwelche Stoffe auffallen. Die α -Strahlen vermögen nur langsame Sekundärstrahlen zu erregen (die schon vorher erwähnten δ -Strahlen), deren Wirkung neben der der primären nicht in Betracht kommt. Eine größere Bedeutung haben sie dagegen bei den γ -Strahlen, da ihrer sekundären β -Strahlung der Hauptanteil an der Ionisierung zuzuschreiben ist (die Primärstrahlen selbst rufen wegen ihres großen Durchdringungsvermögens nur eine geringe Ionisation hervor). Ihre Intensität und damit die Ionisierung ist proportional der Intensität der primären γ -Strahlung und wächst mit wachsendem Atomgewicht des betreffenden Körpers.

Außer der schon erwähnten Ionisierung, die man auch an flüssigen und festen Körpern beobachtet, vermögen die radioaktiven Strahlen noch folgende Wirkungen hervorzubringen:

1. Wärmeentwicklung bei ihrer Absorption.
2. Erregung von Lumineszenz (die in Abschnitt d behandelt wird).
3. Chemische } [für diese sei auf die Lit. ³⁾ verwiesen, da
4. Physiologische } sie hier nicht weiter interessieren].

Bewahrt man ein starkes radioaktives Präparat in einem nach außen gut wärmeisolierten Raume, etwa einem Dewargefäße, auf, so beobachtet man, daß das Präparat ständig eine um mehrere Grade höhere Temperatur als die Umgebung aufweist. Genaue Messungen haben gezeigt, daß 1 g Ra bzw. die damit im Gleichgewicht stehenden Mengen seiner Zerfallsprodukte, bei Absorption ihrer gesamten Strahlung in jeder Stunde die folgenden Wärmemengen in g-Kalorien entwickeln:

Ra	Ra Em	Ra A	Ra (B + C)	Ra F
25,2	28,6	30,5	50,5	27,6
Zusammen: 134,8 g-cal/h				

Da es bei den üblichen Meßanordnungen zwar gelingt, die α - und β -Strahlen vollkommen, von den γ -Strahlen aber nur etwa 15 Proz. zu absorbieren, so erhält man für 1 g Ra im Gleichgewicht zu seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten nur 132,2 g-cal/h = 0,1539 Watt. Für 1 g U bzw. Th im Gleichgewicht mit allen seinen Zerfallsprodukten sind diese Zahlen $8,4 \cdot 10^{-5}$ bzw. $2,4 \cdot 10^{-5}$ g-cal/h*).

Von den chemischen Wirkungen der radioaktiven Substanzen ist die wichtigste die Zerlegung der Silbersalze, welche es gestattet, von Gegenständen Radiogramme (mit Hilfe der β - und γ -Strahlen) herzustellen, aber auch sonst bewirken sie eine große Reihe chemischer Reaktionen, von denen hier nur die Selbstzersetzung der radioaktiven Salze, sowie die Wirkung auf Kautschuk und Ebonit erwähnt werden sollen, weshalb der früher üblichen Aufbewahrung in Ebonitkapseln entschieden zu widerraten ist. Ebenso wenig sind hierfür Röhren aus Quarzglas geeignet, da diese unter dem Einfluß der Strahlung zahllose Risse und Sprünge bekommen, aus denen die Em entweichen kann.

Eine besondere Klasse bilden noch die Verfärbungen, wie man sie an Gläsern (die sich dadurch braun und violett färben), vielen Mineralien, organischen und anorganischen Stoffen beobachtet, und die bei Erwärmung oder Bestrahlung mit ultravioletter Licht unter Aufleuchten meist wieder zurückgehen. Auch an Sidotblende, Bariumplatincyanür usw. (s. Abschnitt d) bemerkt man ähnliche Erscheinungen, wobei gleichzeitig ihre Phosphoreszenzfähigkeit stark nachläßt. Man nimmt an³⁾, daß die β -Teilchen sich an den in den festen Lösungen befindlichen positiven Ionen anlagern und sie dadurch entladen oder

*) Während seiner gesamten Lebensdauer von 2500 Jahren würde sich 1 g Ra-Element $5,5 \cdot 10^8$ und im Gleichgewicht mit seinen sämtlichen Zerfallsprodukten $3,7 \cdot 10^9$ g-cal liefern (zum Vergleich sei angegeben, daß 1 g Kohlenstoff bei seiner Verbrennung nur 8000 g-cal erzeugt).

in niedrigwertigere Bindungsstufen überführen, welche die Ursachen der Farben sein sollen. Bei der ultravioletten Strahlung oder durch Erhitzung sollen sich nun die Elektronen wieder abspalten und die ungeladenen Partikel in positive Ionen zurückverwandelt werden. Es müssen somit die Färbung, wie auch ihre Wiederaufhebung, mit Lumineszenzerscheinungen verbunden sein, die auch vielfach beobachtet worden sind. Diese Erklärung gilt aber nur für die Verfärbungen durch β -Strahlen, bei dem Nachlassen des Leuchtens der durch die α -Strahlen erregten radioaktiven Leuchtfarben (s. 5. Kapitel) sind aber sicherlich andere Faktoren maßgebend, so daß die hierbei beobachtete Zerstörung des Zinksulfids wohl als prinzipiell verschieden von den sonstigen Verfärbungserscheinungen angesehen werden muß.

d) Radiolumineszenz.

Wie Licht und Röntgenstrahlen vermögen auch die von den radioaktiven Substanzen ausgesandten Strahlen eine Reihe von Körpern zum Leuchten zu erregen, was Borgmann⁷⁾ bereits im Jahre 1897 beobachtete. Schon kurze Zeit nach der Isolierung des Ra stellte auch H. Becquerel⁵⁾ vergleichende Messungen über die Stärke der Lumineszenz bei verschiedenen Substanzen an und erhielt für ihre relativen Helligkeiten die folgenden Zahlen:

	Zinksulfid	Bariumplatin- cyanür	Diamant	Urankalium- sulfat}	Flußspat
Substanz . .					
Helligkeit . .	13,36	1,99	1,14	1,00	0,30

Es erwies sich also das Zinksulfid als weitaus am stärksten erregbar, worauf auch besonders F. Giesel⁹⁾ hingewiesen hat; es wird deshalb auch ausschließlich zur Herstellung radioaktiver Leuchtfarben benutzt.

Die Liste der radiolumineszierenden Stoffe ist dann später, namentlich auch durch die Untersuchungen des Ehepaares Curie¹⁾, wesentlich erweitert worden. So erhält man sehr schöne Lichteffekte an den Kristallen der Platindoppelcyanüre des Bariums, Lithiums, Natriums, Calciums, ferner außer am Zinksulfid auch beim Zinksilicat (Willemit) und einer Reihe von Mineralien und Gläsern. Von den Diamanten lumineszieren (in weißem Licht) nicht alle Arten, sondern anscheinend nur die, welche Verunreinigungen enthalten. Nach F. Giesel¹⁰⁾ leuchten auch die festen Lösungen der seltenen Erden (Lanthan, mit minimalen Mengen von Neodym, Praseodym, Samarium) bei Zusatz von Radiumchlorid, je nach der Lösung, in verschiedenen Farben, und zwar anscheinend jahrelang mit nicht wesentlich verringerter Intensität. Ebenso sind starke Ra-Präparate selbstleuchtend und erstrahlen in hellem tief-

blauem Licht³⁾, und zwar um so stärker, je konzentrierter und reiner das Präparat ist; die Intensität ist so groß, daß man die Uhr noch in 20 cm Entfernung ablesen kann. Die Wirkung ist bei feuchten Präparaten geringer, doch tritt Lumineszenz selbst noch bei Lösungen auf. Meist handelt es sich nur um eine sehr kurz dauernde Lumineszenz (Fluoreszenz), doch gibt es auch länger nachleuchtende Substanzen, wie Flußspat, Kunzit und Doppelspat, deren Lichtaussendung man bis zu 24 Stunden nach der Erregung hat verfolgen können.

Das Ehepaar Curie stellte auch fest, daß die Lumineszenz-erregung durch Licht (speziell Ultraviolett), Röntgen- und Radiumstrahlen durchaus nicht parallel zueinander gehen, und daß auch die einzelnen Substanzen durch die drei radioaktiven Strahlenarten in ganz verschiedener Weise beeinflusst werden. So sind Zinksulfid und Diamant vorzugsweise gegen α -, Bariumplatinocyanür und Willemit gegen β - und γ -Strahlen empfindlich^{1) 6)}, doch werden beide auch durch α -, sowie die Sidotblende durch β -Strahlen erregt, und zwar diese zu eigentlicher Phosphoreszenz¹¹⁾, welche in etwa 20 Minuten ein Maximum erreicht und nach Entfernung des radioaktiven Präparates genau in derselben Weise wie die durch Licht erzeugte abfällt (zwei durch eine Kurve ineinander übergehende Gerade), was darauf hinweist, daß beide auf dieselbe Weise entstehen; auch bei Zerstörung des Zinksulfids durch Pulverisierung werden sie in gleicher Weise stark herabgesetzt. Beim Willemit und Bariumplatinocyanür¹¹⁾ fällt die durch β -Strahlen erregte Phosphoreszenz wesentlich schneller ab als beim Zinksulfid, auch wird das (weniger ausgesprochene) Maximum beträchtlich schneller erreicht als bei diesem. Bei der Sidotblende nimmt die Intensität des durch α -Strahlen erregten Leuchtens nach Marsden¹¹⁾ mit wachsender Temperatur (bis 300⁰) ab, während bei tiefen Temperaturen, bis zu der der flüssigen Luft, keine Änderung zu bemerken war; im Gegensatz dazu haben aber andere Beobachter hier ein Nachlassen oder ein Verschwinden der Lumineszenz festgestellt^{1) 8) 13)}.

Die Radiolumineszenz besteht, wie schon vorher erwähnt, aus einzelnen Lichtblitzen (Szintillationen), deren Dauer nach Wood¹⁵⁾ nur $\frac{1}{20000}$ Sekunden beträgt. Während man früher annahm, daß die Szintillationen durch eine mechanische Zerstörung der Kristalle unter dem Einfluß des Bombardements der α -Teilchen bedingt seien und sie also als eine Art Tribolumineszenz ansah [die aber eine wesentlich größere Dauer als die Szintillationen besitzt¹⁵⁾],

führt man sie jetzt, wie die Photolumineszenz, auf die Dissoziation der Zentren zurück^{14) 15)}. Da ein α -Teilchen auf seiner Bahn viele tausend Zentren trifft, so ist jede einzelne Szintillation die Folge der Dissoziation einer großen Zahl von komplexen Molekülen; dabei verliert nach Rutherford¹⁴⁾ das einmal getroffene Zentrum die Fähigkeit zu weiteren Szintillationen. Zunächst wird ihre Zahl dadurch nicht geändert, sondern nur die Intensität des Lichtes, die der Menge der getroffenen unzerstörten Zentren proportional ist, herabgesetzt; auf jeden Fall tritt aber ein allmähliches Nachlassen der Lumineszenz ein (gleichzeitig beobachtet man dabei eine Verfärbung der betreffenden Substanzen); besonders groß ist dieses beim Bariumplatincyanür, wo Beilby⁶⁾, allerdings bei Bestrahlung mit 30 mg Radiumbromid, bereits nach $1/2$ Stunde eine deutliche Braunfärbung durch die β -Strahlen beobachten konnte, während die Intensität nach acht Stunden auf 8 Proz. gesunken war und von da ab konstant blieb. Marsden¹¹⁾ beobachtete bei einem Bombardement von $5 \cdot 10^7$ α -Teilchen/cm².sec sogar eine Abnahme auf die Hälfte in acht Minuten, während es beim Zinksulfid unter gleichen Verhältnissen 40 Stunden und beim Willemit noch länger dauerte (diese beiden Substanzen, bei denen gleichfalls mit der Abnahme der Lumineszenzfähigkeit eine Verfärbung auftritt, werden im 5. Kapitel näher behandelt).

Durch Anwendung von Licht¹¹⁾ oder Auflösung und erneute Kristallisation^{9) 11)} läßt sich beim Bariumplatincyanür die gelbe Farbe und die Lumineszenzfähigkeit wieder herstellen, es ist hier also keine chemische Veränderung eingetreten; dies war nach dem bei den Verfärbungserscheinungen Gesagten zu erwarten, da ja bei diesen Substanzen die Lumineszenz vorzugsweise durch β -Strahlen erregt wird. Ob man das Verfahren aber auch auf das durch α -Strahlung lumineszierende Zinksulfid übertragen kann, ist zum mindesten zweifelhaft, wenigstens liegen hierfür bisher keine Erfahrungen vor. Dem widerspricht auch die durch die α -Bestrahlung erfolgende Umwandlung des Diamanten in Kohlenstoff.

3. Kapitel.

Meßmethoden.

a) Radioaktive Messungen.

1. Einleitung.

Da die am hellsten radiolumineszierende und deshalb bisher ausschließlich zur Herstellung von Leuchtfarbe benutzte Substanz, die Sidotblende, praktisch nur durch die α -Strahlen erregt wird, würde der Wert einer Leuchtfarbe, soweit er auf ihrem Gehalte an radioaktiven Substanzen beruht, am besten durch Beobachtung ihrer α -Aktivität festgestellt werden; wegen der großen hierbei auftretenden Schwierigkeiten bestimmt man ihn aber allgemein durch die γ -Strahlung. Neben diesen beiden kann gelegentlich noch die Messung der entwickelten Em in Frage kommen.

Die Messung der Strahlung erfolgt durch ihre Ionisierungsstärke q , d. h. die in dem abgeschlossenen Luftvolumen V eines Kondensators (Ionisierungskammer) im Kubikzentimeter und der Sekunde erzeugte Zahl von Ionen. Der von diesen gelieferte Sättigungsstrom S ist gegeben durch $S = q \cdot \epsilon \cdot V$, wo ϵ das elektrische Elementarquantum ist; beim selben Kondensator verhalten sich also die Sättigungsströme wie die Ionisierungsstärken und damit wie die radioaktiven Mengen (desselben Elementes). Es ist deshalb am praktischsten, das zu messende Präparat unter identischen Bedingungen mit einem solchen von bekanntem Gehalt (Normale) zu vergleichen, dessen Betrag an radioaktiver Substanz von einer Behörde (z. B. der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt) bestimmt ist. Bei verschiedenen Substanzen ist indessen dabei noch zu berücksichtigen, daß bei gleicher Strahlenmenge die Ionisierungsstärken voneinander abweichen, und daß ferner ihre Strahlen im Kondensator nicht gleichmäßig ausgenutzt werden. Besonders gilt dies für die γ -Strahlen, da der größte Teil ihrer Ionisierung von den an den Luftmolekülen und den Gefäßwänden erzeugten Sekundärstrahlen herrührt und somit auch von dem Material der Ionisierungskammern beeinflusst wird. Im radioaktiven Gleichgewicht gilt nach Gleichung (5) die Beziehung:

$$\lambda_1 \cdot Z_1 = \lambda_2 Z_2 = \dots,$$

wo λ die Zerfallskonstanten und Z die Atomzahlen der einzelnen Elemente bedeuten. Der von ihnen gelieferte Sättigungsstrom ist somit:

$$i = K_1 \cdot \lambda_1 \cdot Z_1 + K_2 \cdot \lambda_2 \cdot Z_2 + \dots, \quad (10)$$

wo $K_1, K_2 \dots$ Faktoren sind, die von der Art der Strahlen (α, β, γ), ihrer Absorptionsfähigkeit und der Meßanordnung (Größe des Luftvolumens, Entfernung der Elektroden, Druck und Natur des Gases) abhängen.

Sind die erzeugten Ströme genügend stark, so kann man sie in der üblichen Weise mittels eines empfindlichen Spiegelgalvanometers bestimmen. Meist werden sie hierzu aber zu schwach sein, so daß man zur elektrometrischen Messung übergehen muß. Diese

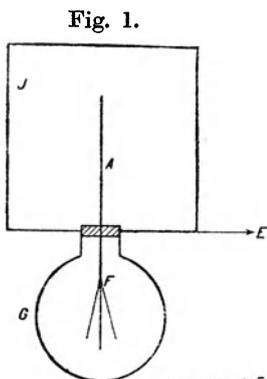


Fig. 1.

Strommessung mit Elektrometer; Methode des Spannungsabfalles.

kann in verschiedener Weise ausgeführt werden; in der Regel verbindet man die isolierte Elektrode A (Fig. 1) der Ionisationskammer J mit dem Faden- (oder Blättchen-) träger F des Elektrometers, während man sein Gehäuse G und das des Kondensators J erdet, und beobachtet den Rückgang des geladenen Instrumentes. Die Verbindung erfolgt am besten durch unmittelbares Aufsetzen der Ionisationskammer auf das Elektrometer, sonst durch Drähte, welche durch geerdete Metallrohre elektrostatisch geschützt sind; diese werden mit Paraffin ausgegossen, um die Ionisierung, welche in den so gebildeten Zylinderkondensatoren erfolgen würde, zu verhindern. Bezeichnet C die Kapazität

von Elektrometer + Ionisationskammer, V das Potential, so ist

$$i = C \cdot \frac{dV}{dt} = C \cdot \frac{V_1 - V_2}{t},$$

wenn V_1 und V_2 die zu Beginn und zum Ende der Zeit t durch den Ausschlag gemessenen Potentiale sind. Von der Kenntnis der Kapazität und der Eichkurve des Elektrometers wird man unabhängig, wenn man die Beobachtungen unter denselben Bedingungen mit einem bekannten Ra-Präparat für dieselben Skalenteile wiederholt. Werden in diesem Falle Strom und Zeit mit J und T bezeichnet, so gilt:

$$i = J \cdot T/t,$$

und somit auch:

$$m = M \cdot T/t,$$

wobei m und M die Mengen radioaktiver Substanz in den beiden Präparaten bedeuten. Von dem gemessenen Abfall ist noch die

natürliche Zerstreung in Abzug zu bringen, d. h. der Rückgang der Blättchen, welcher auch bei Abwesenheit der Präparate infolge der Ionisierung durch die überall in den Wänden und in der Luft vorhandenen radioaktiven Substanzen erfolgt. Dazu bestimmt man, am besten vor und nach jeder Messung, die Zeit t' zum Durchlaufen derselben Skalenteile; es ist dann:

$$i = C (V_1 - V_2) \cdot (1/t - 1/t').$$

Bei ungenügender Isolation wegen zu großer Luftfeuchtigkeit trocknet man Elektrometer und Ionisierungskammer durch metallisches Natrium.

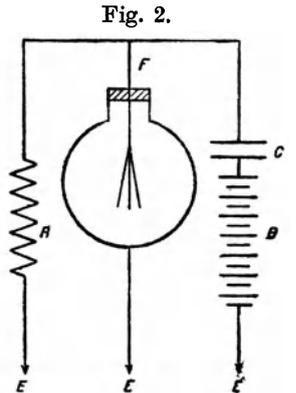
Bei einer anderen Methode beobachtet man nicht den Abfall, sondern die Aufladung des Elektrometers; zu diesem Zwecke verbindet man das Gehäuse der Ionisierungskammer mit dem einen Pol einer Batterie von Akkumulatoren oder Trockenelementen, welche ausreichen, um den Sättigungsstrom zu erzeugen; die Messung gestaltet sich im übrigen genau so, wie bei der Beobachtung des Abfalles. Sehr gut ist für manche Zwecke auch die Methode des konstanten Anschlages*), bei welcher man F (Fig. 2) mit dem Kondensator C , in welchem der Strom durch die Hochspannungsbatterie B erzeugt wird, und außerdem mit einem großen geerdeten Widerstand R verbindet (sehr gut isolierten Flüssigkeitswiderstand oder metallisierten Quarzfaden; als Widerstand kann man auch einen Plattenkondensator benutzen, in welchem durch ein schwaches radioaktives Präparat eine geringe Ionisierung hervorgerufen wird). Zeigt das Elektrometer das Potential v , so ist der Strom:

$$i = v/R.$$

2. α -Strahlenmessung.

Die Messung der α -Strahlen kommt vorzugsweise bei Substanzen in Frage, welche keine Em abgeben (also U, Th, Ra F),

*) Auf die Kompensationsmethode durch einen piezoelektrischen Quarz oder Änderung einer Kapazität sei hier nur hingewiesen.



Strommessung mit Elektrometer; Methode des konstanten Ausschlages.

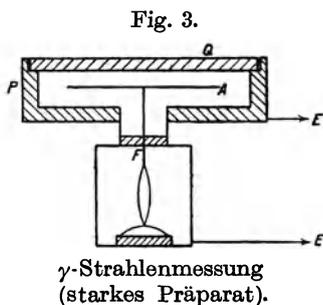
da andernfalls durch ihre Umwandlungsprodukte die Ionisierungskammer radioaktiv infiziert werden würde. Emanierende Substanzen muß man durch nicht poröse, sehr dünne Blättchen (Größenordnung höchstens 0,01 mm Dicke) aus Aluminium oder Glimmer luftdicht abschließen. Störend für die Auswertung ist aber die Verschiedenheit der Reichweiten der von den einzelnen Folgeprodukten ausgesandten α -Strahlen, außerdem bleibt zu berücksichtigen, daß auch die β - und γ -Strahlen zur Ionisierung beitragen. Als Ionisierungskammer empfiehlt sich namentlich der halbkugelförmige Kondensator nach Greinacher³⁾ mit Stiftelektrode (dessen Radius mindestens 9 cm betragen muß, damit auch die α -Strahlen größter Reichweite vollkommen ausgenutzt werden); das zu messende Präparat wird in einer flachen Schale in den Kugelmittelpunkt gebracht. Bei allen α -Strahlenmessungen ist es außerordentlich schwierig, Sättigungsstrom zu erhalten, selbst ein Potentialgefälle von 1500 Volt/cm ist noch nicht ausreichend. Für praktische Zwecke ist aber 85 Proz. Sättigung genügend, namentlich wenn das Präparat mit einer etwa gleich starken Normale verglichen wird *). Es genügen dann bei Stromstärken bis zu 15 est. E. = $5 \cdot 10^{-9}$ Amp. 100 Volt/cm. Bei den Messungen ist wegen der starken Absorption der α -Strahlen Rücksicht auf die Schichtdicke des Präparates zu nehmen; nur bei unendlich dünnen Schichten, wie man sie etwa bei elektrolytischen Niederschlägen erhält, ist die Stromstärke proportional dem Gehalt an radioaktiver Substanz (wobei aber schon die nicht zu vermeidenden Unebenheiten und auch eine etwaige Wasserhaut störend wirken), bei unendlich dicker Schicht, wozu schon 0,1 mm genügt, dagegen proportional der Oberfläche und nicht dem Gewicht.

Als Normale für Vergleichsmessungen empfiehlt sich am meisten das von seinen Zerfallsprodukten, namentlich vom U X, befreite Uranoxyduloxyd (U_3O_8), das (am besten) in Alkohol aufgeschlemmt und in eine flache Schale gleichmäßig ausgegossen wird. Zur Herstellung unendlich dicker Schichten genügt eine Menge von 15 bis 20 mg/cm². 1 cm² U_3O_8 liefert dann bei einseitiger Messung, wie sie im Greinacherschen Kondensator erfolgt, einen Strom von $1,73 \cdot 10^{-3}$ est. E. = $5,78 \cdot 10^{-13}$ Amp. Die geringste noch nachzuweisende Menge beträgt unter günstigen Bedingungen $7 \cdot 10^{-10}$ mg Ra.

*) Tabelle zur Umrechnung bei nicht vollständiger Sättigung findet man bei Meyer und Schweidler¹⁾, S. 240.

3. γ -Strahlenmessung.

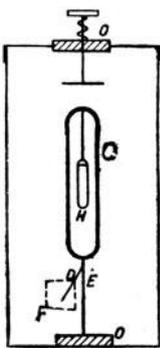
Geeignete Ionisierungskammern für γ -Strahlenmessungen starker Präparate, die sich außerhalb des Kondensators befinden, sind namentlich von Heß⁴⁾ angegeben; ihre Wandstärke muß mindestens 2 bis 3 mm Blei betragen, damit die β -Strahlen völlig absorbiert werden. Besonders hat sich hierbei die Form einer flachen zylindrischen Trommel mit einer plattenförmigen Elektrode in der Mitte bewährt. Da das Ergebnis wegen der verschiedenen Absorptionsfähigkeiten von der Dicke der Eintrittswand abhängt, so ist man übereingekommen, die von den Strahlen bei ihrem Eintritt zu durchsetzende Gefäßwand aus 5 mm starkem Blei zu machen. Für unsere eigenen Messungen haben wir den in Fig. 3 wiedergegebenen Apparat benutzt, der aus einem 10 mm starken gegossenen Bleigefäß *P* von 10 cm Höhe besteht, auf welches ein 5 mm starker, 40 cm im Durchmesser haltender Deckel *Q* aus Walzblei aufgesetzt und verkittet ist. Zum Schutz gegen die α -Strahlung, welche von den in dem Handelsblei stets enthaltenen Substanzen ausgehen, ist das ganze Innere mit Aluminiumblech ausgekleidet. Das Bleigefäß trägt unten ein Wulfsches Zweifadenelektrometer⁶⁾, auf dessen Fadenträger *F* die Aluminiumelektrode *A* aufgesetzt ist [ebenso gut hätte natürlich auch ein Wulfsches Einfadenelektrometer⁷⁾ oder ein Saitenelektrometer nach Lutz⁵⁾ benutzt werden können]. Das zu messende Präparat ist senkrecht über dem Gefäßmittelpunkt angebracht; es ist dabei darauf zu achten, daß es von allen Wänden, Zimmerdecke usw. mindestens 2 m entfernt bleibt, da andernfalls die dort erregten Sekundärstrahlen störend einwirken. Das Elektrometer selbst ist gegen die direkte Strahlung durch die Bleischichten gut geschützt. Die kleinste unter günstigsten Umständen zu messende Menge beträgt $3 \cdot 10^{-4}$ mg.



Schwächere Präparate muß man zur allseitigen Ausnutzung der von ihnen ausgesandten Strahlen in die Ionisierungskammer hineinbringen. Namentlich zur Messung des Gehaltes der Leuchtfarben an radioaktiver Substanz hat sich die von Bothe²⁾ gegebene Anordnung sehr gut bewährt; sie besteht aus einem Zylinder-

kondensator *A* (Fig. 4) aus Zinkblech von 200 mm Durchmesser und 320 mm Höhe, dessen innere von dem Isolator *O* getragene Elektrode von einem Hohlzylinder *C* von 25 mm Durchmesser und 160 mm Höhe gebildet wird; *A* und *C* sind innen bzw. außen mit 0,5 mm starkem Bleiblech bekleidet. Das Elektrometer befindet sich im Innern des Zylinders selbst und besteht einfach aus dem Blättchenträger *E* und dem Aluminiumblättchen *D*, dessen Ausschlag mikroskopisch durch das Fenster *F* beobachtet wird; die Ladung erfolgt durch den Ladestift *G*. Das zu messende Präparat *H* wird in einem zugeschmolzenen Glasröhrchen in der Mitte von *B* aufgehängt. Man kann hiermit bis 10^{-4} mg/cm³ Substanz messen (bei ganz besonders feinen Meßanordnungen beträgt die untere Grenze $2 \cdot 10^{-6}$ mg).

Fig. 4.



γ -Strahlenmessung
(schwaches Präparat).
Apparat nach Bothe.

Zu berücksichtigen ist bei allen Messungen noch die Absorption der γ -Strahlen in der das Präparat umschließenden Hülle. Sie beträgt bei 1 mm Glas fast genau 1 Proz.; handelt es sich um nicht nahezu reine Präparate, sondern um Leuchtfarben, so tritt dazu noch die in dem Zinksulfid. Die gesamte Absorption in einem 6 mm weiten Glasröhrchen von 0,5 mm Wandstärke mit lose eingefüllter Leuchtfarbe wurde bei unseren Versuchen zu 3,94 Proz. berechnet, wobei ihr Raumgewicht zu 2,1 bestimmt war. Die Beobachtungen mittels zweier in Zinksulfid eingebetteter, in sehr dünne Glasröhrchen eingeschlossener Radiumpräparate ergab 3,5 bzw. 4,2, im Mittel also den mit dem berechneten gut übereinstimmenden Wert von 3,85 Proz., so daß man mit 4 Proz. unter den angegebenen Verhältnissen rechnen kann.

Im Gegensatz zu den α -Strahlen ist bei γ -Strahlenmessungen Sättigungsstrom sehr leicht zu erhalten; bis zu Stromstärken von 30 est. E. = 10^{-8} Amp. genügt ein Potentialgefälle von 100 Volt/cm.

Die γ -Strahlenmessungen gelten allgemein zur Bestimmung des Radiumgehaltes. Auf Beschluß des Kongresses für Radiologie und Elektronik in Brüssel im Jahre 1910 hat Frau Curie ein Präparat von 21,9 mg wasserfreien Chlorides im Jahre 1911 hergestellt, das im Bureau international des mesures et poids in Paris aufbewahrt wird und als internationales Standard dient. Drei in Wien von

Hönigschmidt hergestellte Präparate sind mit diesem verglichen und ergaben Übereinstimmung bis auf $\frac{1}{300}$; das größte derselben mit 31,17 mg Radiumchlorid dient als internationales Ersatzstandard. An das Pariser Standard sind nun eine Reihe von Normalen, die gleichfalls in Wien hergestellt wurden, angeschlossen, welche als Hauptnormalen für die radioaktiven Messungen in den einzelnen Ländern gelten. Das deutsche Normal mit 19,73 mg Radiumchlorid wird in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt aufbewahrt und dient dieser zur Kontrolle ihrer sekundären Normalen, an welche die zu prüfenden Präparate angeschlossen werden. Für Messungen mit dem Bothe-Apparat empfehlen sich sekundäre Normalen mit etwa $\frac{1}{10}$ und $\frac{1}{100}$ mg Ra-Element. Es können somit Ra-Präparate über die Physikalisch-Technische Reichsanstalt an das internationale Normal angeschlossen und so durch ihre γ -Strahlung die entsprechenden Gewichtsmengen bestimmt werden. Dabei ist es notwendig, sie etwa ein Monat lang zu lagern, damit das Ra mit seinen Zerfallsprodukten, von denen ja nur das Ra C genügend durchdringende γ -Strahlen aussendet, in das Gleichgewicht kommt; bei kürzerer Zeit muß man aus dem bekannten Anstieg den Endwert berechnen. Dieser Vergleich kann sich aber eigentlich nur auf Ra-Präparate beziehen, da andere Substanzen wegen der verschiedenen Absorption ihrer γ -Strahlen andere Werte geben. Nun ist es indessen beim Ms Th, der nächst dem wichtigsten radioaktiven Substanz, nicht möglich, einen Standard zu schaffen, da es wegen seiner Halbwertzeit von nur 5,5 Jahren zu schnell zerfällt; andererseits ist es auch bisher nicht möglich gewesen, eine genügende große Gewichtsmenge reinen Ms Th herzustellen, um die γ -Strahlung von 1 g oder 1 mg Gewicht mit der des Ra zu vergleichen. Man schließt deshalb auch Ms Th-Präparate durch ihre γ -Strahlung an das Ra-Standard an, und versteht deshalb unter 1 g Ms Th nicht das Gewicht, sondern diejenige Menge, welche durch 5 mm Blei dieselbe γ -Strahlung wie 1 g Ra liefert. Nun ist das Ms Th₁ mit dem Ms Th₂, dem eigentlichen γ -Strahler, ja bereits nach 55 Stunden im Gleichgewicht, von seinen Zerfallsprodukten sendet aber auch das Th C durchdringende γ -Strahlen aus, so daß damit anscheinend die Ms Th-Menge mit wachsendem Alter anfangs zunimmt, um später wieder abzufallen; außerdem hängt das Ergebnis überhaupt noch von der Meßanordnung ab. Befindet sich das Präparat, wie bei der Messung mit dem Bothe-Apparat, innerhalb der Ionisierungskammer, so wäre die nächstliegende Vermutung, daß die Strahlen stärkerer Absorbierbarkeit

eine größere Ionisierung hervorrufen würden, doch stehen die meisten Messungen mit dieser Annahme im Widerspruch. Liegt es dagegen außerhalb des Kondensators, wie bei der Messung starker radioaktiver Substanzen, so muß man anscheinend ihre Wirkung umgekehrt proportional dem Absorptionskoeffizienten μ setzen, da es hierbei im wesentlichen auf die Ionisierung durch die erzeugten weichen Sekundärstrahlen ankommt. Aus einer eingehenden Erörterung von Meyer und Schweidler ¹⁾ (S. 229) folgt, daß bei jungen Präparaten der Ms Th dem Ra-Gehalt gegenüber unter-, mit zunehmendem Alter dagegen zunächst über- und später wieder unterschätzt wird. Während die α -Strahlung des Ms Th in 4,58 Jahren ihr Maximum erreicht (wie sich aus Gleichung (8) ergibt, da es selbst keine α -Strahlen aussendet), hängt die Zeit des Maximums der γ -Strahlung wegen der Bildung von Th C noch von der Meßanordnung ab. Nach Gleichung (10) ist im Gleichgewicht die Stromstärke gegeben durch

$$i = \lambda_M \cdot Ms\ Th + K \cdot \lambda_R \cdot Rd\ Th.$$

Sie erreicht, je nach dem von der Meßanordnung abhängenden Werte von K , das Maximum in folgenden Zeiten (s. Tabelle 10):

$K = 0,8$	1,0	1,3	1,5
Max. nach 2,0	2,5	3,0	3,0 Jahren.

Ganz kompliziert gestaltet sich die Messung nun noch dadurch, daß das technisch gewonnene Ms Th noch Ra, je nach dem Ausgangsmaterial in verschiedenem Betrage (im allgemeinen bis zu 20 Proz. γ -Äquivalent), enthält, und daß ferner den Leuchtfarben außer dem durch den Zerfall des Ms Th entwickelten Rd Th von vornherein ein Zusatz dieses radioaktiven Elementes gegeben wird. Eine Trennung der drei Bestandteile: Ra, Ms Th und Rd Th ist theoretisch zwar möglich; man könnte z. B. die Leuchtfarbe in Lösung bringen, die Em nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes, also nach etwa einem Monat auskochen, dann die Ra Em, nachdem die Th Em nach sechs Minuten völlig verschwunden ist, allein messen und so den Ra-Gehalt bestimmen. Ferner könnte man das Rd Th abscheiden und seine Menge allein feststellen, so daß sich dann auch der Ms Th-Gehalt ergeben würde. Praktisch wird diese Trennung aber kaum zu einwandfreien Ergebnissen führen und wäre dazu noch mit sehr großen Kosten verknüpft, da man eine größere Menge von Leuchtfarbe (bei stärkerer etwa 15 g, bei schwächerer entsprechend mehr) opfern müßte, so daß man sich in bezug auf die Zusammensetzung der Leuchtfarbe wesent-

lich auf die Angabe des Lieferanten verlassen muß. Einfacher ist die Prüfung einer angeblich reinen Ra-Leuchtfarbe auf einen Gehalt an Ms Th. Zu dem Zweck löst man sie auf und dampft wieder ein, wodurch die Ra Em und das Ra C ausgetrieben werden. Mißt man nach drei Stunden, so dürfte sich noch keine merkliche γ -Aktivität zeigen, da sich dann noch zu wenig Ra C entwickelt hat. Tritt eine solche trotzdem auf, so rührt sie vom Ms Th₂ her, das sich aus dem Ms Th₁ ja bereits wieder in größerer Menge gebildet hat. Eine andere Möglichkeit bestände darin, die Leuchtfarbe mit einem Ra-Präparat zu vergleichen, während man sie mit verschiedenen absorbierenden Substanzen umgibt. Ist kein Ms Th vorhanden, so muß das Verhältnis der Normale zu dem Präparat immer dasselbe bleiben, während sich bei Anwesenheit von Ms Th wegen der anderen Absorptionsefähigkeit seiner γ -Strahlen abweichende Verhältnisse ergeben würden.

4. Emanationsmessungen.

Größere Em-Mengen können auch nach der γ -Strahlenmethode gemessen werden, wozu man sie in möglichst enge Glasröhrchen einschließt. Für kleinere Beträge, wie sie bei Leuchtfarben auftreten, kommt nur die Messung ihrer α -Aktivität in Frage. Um die in einem Präparat gebildete Em völlig abscheiden zu können, ist der einzige Weg, es in Lösung zu bringen. Die nach Erreichung des Gleichgewichts oder nach einer bestimmten Zeit angesammelte Em wird dann, am besten durch Auskochen der Lösung, in eine evakuierte Ionisierungskammer überführt. Mit der Messung wartet man vorteilhaft drei Stunden, bis die Em mit ihren Zerfallsprodukten im Gleichgewicht ist. Zum Vergleich nimmt man zweckmäßig eine Ra-Normallösung, die man sich durch Auflösen einer nach der γ -Strahlenmethode bestimmten Ra-Menge und Verdünnen mit Wasser hergestellt hat. Das Wasser muß angesäuert sein, um zu vermeiden, daß sich das Ra in nicht emanierender Form an den Wänden ablagert. Die Em-Menge gibt man meist in Curie oder Millicurie an und versteht darunter die Menge, die mit 1 g bzw. 1 mg Ra-Element im Gleichgewicht ist (1 Curie entspricht einer Menge von 0,67 cm³ bei 0° und 760 mm). Das Gewicht von 1 Curie würde sich nach Gleichung (5) zu

$$\frac{1,26 \cdot 10^{-11}}{2,08 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{222}{226} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ g}$$

ergeben.

Die Th-Em läßt sich wegen ihres schnellen Zerfalls auf diese Weise nicht bestimmen.

b) Lichtmessungen.

Bei den Leuchtfarben interessiert eigentlich nicht so sehr ihr Gehalt an radioaktiver Substanz, sondern die von deren Strahlen hervorgerufene Lichtwirkung, d. h. ihre Flächenhelle (Helligkeit in Hefnerkerzen/cm² leuchtender Fläche) sowie die Leuchtdauer. Sehr helle Leuchtfarben kann man mit den üblichen Photometern messen; so benutzten Marsden⁶⁾ und der Verf. (s. Kapitel 5) das Lummer-Brodhun-Photometer, wobei, wenn nötig, entsprechende Farbfilter vorzuschalten sind, um das Licht der Vergleichslampe auf gleichen Farbenton mit der Leuchtfarbe zu bringen. Bahr²⁾ verwendete statt dessen das Webersche Photometer, bestimmte aber mit diesem nicht direkt die Flächenhelle e , sondern die Beleuchtungsstärke E der Leuchtfarbe. Eine Umrechnung auf die Flächenhelle kann mit Hilfe der Formel [Ableitung s. Liebenenthal¹⁾, S. 187]

$$e = \frac{E \cdot M}{10000 \cdot \pi}$$

erfolgen, wobei M die Albedo bedeutet. Im Anschluß an Bahr wollen wir für diese den Wert für weiße Pappe ($M = 0,7$) wählen, dann wird

$$e = 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot E \text{ HK/cm}^2.$$

Bei schwachen Leuchtfarben scheiden diese Methoden aus, da sie bei sehr geringen Helligkeiten nicht mehr genügend empfindlich sind. Walter⁸⁾ benutzt deshalb als Photometer einfach einen weißen Pappschild, der durch einen senkrecht zu seiner Ebene stehenden schwarzen Schirm in zwei Felder geteilt ist. Dem einen, gegen die Bestrahlung durch die Vergleichslampe geschützten, wird die Leuchtfarbe auf einen geringen Betrag genähert, während der Abstand jener von dem anderen so lange geändert wird, bis beide Felder gleich hell erscheinen. Die Lichtstärken verhalten sich dann umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen und die Flächenhelle ergibt sich hieraus durch Division mit dem Flächeninhalt der Leuchtfarbe. Becquerel³⁾, der sich mit relativen Messungen begnügte, benutzte als Vergleichslichtquelle eine durch eine Acetylenlampe beleuchtete Mattglasscheibe und änderte ihre Helligkeit durch eine veränderliche Blende.

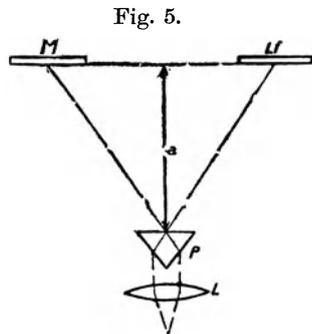
Da in der Bestimmung des Flächeninhaltes zuweilen eine gewisse Schwierigkeit steckt, begnügen sich andere Beobachter mit

der Bestimmung der Beleuchtungsstärke, wobei sie im Prinzip wie Walter verfahren. Am besten ausgebildet ist diese Methode im American Bureau of Standards von Dorsey⁴⁾. In einem 2 bis 3 m langen, innen geschwärzten Kasten von 30 cm² Querschnitt ist eine kleine Glühlampe von 1,5 bis 2 Normalkerzen, die auf einem kleinen Wagen steht, mittels eines endlosen in Zentimeter geteilten Stahlbandes verschiebbar. In die Vorderwand ist eine 2 bis 3 cm² große Mattscheibe mit einem entsprechenden Farbfilter eingesetzt; bewegliche schwarze Blenden und Schirme schützen sie gegen das etwa von den Wänden reflektierte Licht. Die Leuchtfarbe wird auf einem Karton oder in einem dünnwandigen Glasrohr von kleinem Durchmesser direkt auf die Mattscheibe gelegt und die Lampe verschoben, bis beide gleich hell erscheinen; das Rohr wird dabei auf $\frac{2}{3}$ seines Umfanges geschwärzt, um die Mattscheibe gegen das von ihm ausgehende Licht zu schützen, da andernfalls Fehler bis zu 10 Proz. auftreten können. Die Blicklinie des Beobachters, dessen Auge, wie bei allen anderen Methoden auch, durch längeren Aufenthalt im Dunkelraum gut dunkel adaptiert sein muß, hat senkrecht zur Mattscheibe zu stehen. Die Beleuchtungsstärke ist dann gleich P/r^2 , wo r der Lampenabstand und P ein Proportionalitätsfaktor ist, der durch Photometrierung der Lampe (e') und der Mattscheibe bestimmt wurde. Letztere ergab sich bei der Beleuchtung durch 1 MK von hinten zu 3,96 Mikrolambert = 0,0396 MK. Es wird also

$$E = \frac{0,0396 \cdot e'}{r^2} \text{ MK.}$$

Ähnliche Methoden sind in England und in den Vereinigten Staaten mehrfach im Gebrauch. Eine sehr einfache Meßanordnung hat Metzner⁷⁾ angegeben; die Mattscheibe M (Fig. 5) und die Leuchtfarbe Lf oder statt dieser ein von einer Normallampe beleuchteter Gipsschirm werden durch Vermittelung des Prismas P und einer auf seine Kante scharf eingestellten Lupe L betrachtet.

Die Entfernung a und der Abstand zwischen Mattscheibe und Leuchtfarbe sind so gewählt, daß beide Lichtquellen möglichst dicht aneinander gerückt und nur durch eine feine Linie getrennt erscheinen.



Helligkeitsmessung von
Leuchtfarben nach Metzner.

Störend ist bei allen bisher genannten Methoden, daß mehrere Beobachter verschieden einstellen, wenn die Farbtöne beider Felder nicht absolut gleich sind. Weitere Fehler rühren von dem Purkinjeschen Phänomen her, wodurch sich das Helligkeitsverhältnis mit dem Abstände des Auges ändert, so daß man nur sehr angenäherte Werte erhält⁴⁾.

Frei von diesem Übelstande ist die objektive Messung mittels der photoelektrischen Zelle, die unter sich durchaus vergleichbare Werte gibt (welche durch Photometrie einer hellen Leuchtfarbe auf absolutes Maß umgerechnet werden können), wie sie auch schon von Richtmyer¹⁷⁾, Lenard¹⁵⁾ (bei der Messung der Lichtsumme) und von Nichols und Merritt [Kapitel I]²⁰⁾ bei phosphoreszierenden Substanzen benutzt worden ist*). Die Photozelle besteht aus einer Glaskugel von etwa 5 cm Durchmesser, deren eine Halbkugel auf der Innenfläche versilbert und mit einem dünnen Belag von Natrium, Kalium, Rubidium oder Cäsium bedeckt ist, welche durch Zersetzung ihrer Hydrüre mittels Kathodenstrahlen in die kolloidale Modifikation übergeführt sind. Bei Belichtung spaltet diese Elektronen ab, welche durch ein an den Silberbelag gelegtes negatives Potential beschleunigt werden und dadurch den Gasinhalt (0,5 bis 1 mm Argon) durch Stoß ionisieren. Die negativen Elektronen wandern unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zu einem in die unbelegte Halbkugel eingeschmolzenen Platinring, der mit einem empfindlichen Elektrometer (wir benutzten ein Einfadeninstrument nach Wulf) in Verbindung steht und dieses aufladet. Der so erzeugte lichtelektrische Strom ist, wie Elster und Geitel¹¹⁾ für Lichtstärken von 0,3 Sonnenhelligkeit bis $6 \cdot 10^{-4}$ mK nachgewiesen haben, streng proportional der Belichtung. Diese Beziehung ist auch von mehreren Beobachtern bestätigt^{12) 14) 18)}, während von anderer Seite, namentlich bei sehr starker Beleuchtung, Abweichungen hiervon bemerkt worden sind^{9) 13)}. Für sehr geringe Helligkeiten trifft sie aber sicher zu, ebenso ist auch ihre Konstanz über längere Zeiträume wiederholt festgestellt^{14) 15)}. Radiumstrahlen sind dabei, wie schon Dember¹⁰⁾ festgestellt hat, und wie auch durch eigene Beobachtungen ermittelt wurde, ohne Einfluß.

Im gewissen Sinne störend wirkt bei den photoelektrischen Zellen, daß sie für die einzelnen Wellenlängen in verschiedener

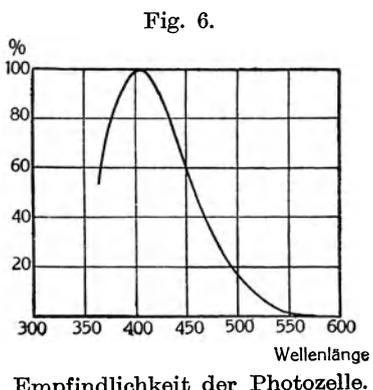
*) Für eine ausführliche Darstellung der Photoelektrizität sei auf Pohl und Pringsheim¹⁶⁾ verwiesen.

Weise empfindlich sind. So geben Guthnick und Prager¹²⁾, für eine Kaliumzelle aus Uviolglas die folgenden Werte an, die aber für die einzelnen Zellen individuell verschieden sind (s. auch Fig. 6).

λ	578	546	436	405	365 $\mu\mu$
Empfindlichkeit .	0,88	1,31	76,0	100,0	52,7

Die Empfindlichkeit ist also im Rot und Gelb verschwindend gering, wird im Grün merklich, erreicht im Blau ein Maximum und sinkt dann wieder mit abnehmender Wellenlänge. Untersucht man nun

Lichtquellen gleicher spektraler Zusammensetzung, so wirkt dies nicht weiter störend, andernfalls muß man den zu messenden Spektralteil isolieren. Dies ist auch bei den Leuchtfarben notwendig, da sie mit wachsendem Alter ihr Spektrum ändern; (s. 5. Kapitel). Es wurde deshalb bei unsern Versuchen durch ein geeignetes Filter, das aus einem starken Gelb- und einem schwachen Blauglase kombiniert war, die auf das Auge allein einwirkende grüne Bande



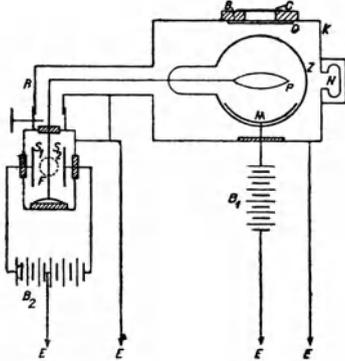
des Zinksulfids ausgeblendet und nur ihre Intensität gemessen; etwaige Änderungen im Rot spielen keine Rolle, da dieses auf die Photozelle nicht einwirkt. Das Maximum der Empfindlichkeit liegt bei Zellen aus den genannten Metallen an verschiedenen Stellen des Spektrums, und zwar bei solchen aus Uviolglas für

	Na	K	Rb	Cs
bei	340	405	436	365 $\mu\mu$.

Für unsere Versuche wäre somit eine Rubidiumzelle wohl am vorteilhaftesten gewesen; da aber die Alkalimetallzellen in bezug auf ihre Konstanz besser erforscht sind als die aus Erdalkalimetallen, wurde auf Vorschlag der Herren Elster und Geitel eine solche mit Kaliumfüllung verwendet. Der lichtelektrische Strom ist nun weiterhin eine Funktion der an die Zelle gelegten Spannung und wächst mit dieser stark, etwa nach einer Hyperbelfunktion, an, bis beim Überschreiten eines bestimmten Wertes leuchtende Entladung einsetzt, wodurch sich die Eigenschaft der Zelle ändern kann. Auf konstantes Potential ist deshalb stets zu achten.

Unsere Zelle Z (Fig. 7) befand sich in einem allseitig geschlossenen Metallbehälter K , der bei N , wenn nötig, durch Natrium getrocknet werden konnte. Die Leitung von dem negativen Pol der Batterie B_1 von 80 kleinen Akkumulatoren war isoliert zu dem Belag M von kolloidalem Kalium geführt. In dem Deckel des Kastens K war ein Glasfenster G angebracht; auf diesem lag zunächst eine Metallblende B , in welche verschiedene Einsätze gelegt werden konnten, und auf dieser die Küvette C mit der Leuchtfarbe. Von dem Platindraht P führte die Zuleitung in dem mit Paraffin ausgegossenen und geerdeten Schutzrohre R zu dem Faden F des Wulfschen Einfaden-

Fig. 7.



Helligkeitsmessung mit der Photozelle.

und geerdeten Schutzrohre R zu dem Faden F des Wulfschen Einfaden-

elektrometers. Seine Schneiden S_1 und S_2 waren mit den beiden Polen einer Batterie B_2 verbunden, deren Mitte geerdet war. In die verschiedenen Erdleitungen waren hohe Widerstände gelegt, um die Gefahr eines Kurzschlusses zu vermeiden. Da sich die Empfindlichkeit der Zelle und des Elektrometers mit der nie ganz konstant bleibenden Spannung der Batterien B_1 und B_2 ändert, wurde die unverrückbar aufgebaute Zelle mittels einer an der Decke befestigten kleinen Glühl-

lampe L durch dasselbe Filter geeicht. Diese wurde mit Unterspannung gebrannt und ihre Stromstärke, die genau konstant gehalten werden mußte, mittels eines Kompensationsapparates und Normalwiderstandes eingestellt. Die Lampe L hing an einem kleinen Wagen, der noch eine zweite Lampe trug, die leicht an die Stelle von L gebracht werden konnte und zu ihrer Kontrolle diente *).

*) Bei der Messung war der Faden auf den Teilstrich — 5 gestellt und stets die Zeit zum Durchlaufen der Skalenteile 0 bis + 5 beobachtet. Bei Erdung kehrte der Faden stets gut auf den Nullpunkt zurück. Dunkelstrom (d. h. Strom bei abgedeckter Zelle) wurde nie beobachtet.

4. Kapitel.

Zusammensetzung und Herstellung der Leuchtfarben.

a) Einleitung.

In den vorhergehenden Ausführungen ist bereits mehrfach erwähnt, daß eine radioaktive Leuchtfarbe aus Sidotblende besteht, welcher eine bestimmte Menge eines α -Strahlers zugesetzt wird. Von diesen kommen natürlich nur diejenigen in Frage, welche eine genügende Lebensdauer haben (s. Tabelle I), so daß die *A*- und *C*-Produkte der Ra- und Th-Familie, sowie die Th Em von vornherein ausscheiden. Als nächste Substanzen wären dann die Ra Em und Th X zu berücksichtigen, die zu einem nicht zu hohen Preise gewonnen werden könnten; beide sinken aber in 3,85 bzw. 3,64 Tagen schon auf ihren halben Betrag und in demselben Maße würde auch die Leuchtkraft nachlassen, während sie in 25,6 bzw. 24 Tagen bis auf 1 Proz. abgefallen wären. Auch diese kann man also zur Herstellung einer Dauerleuchtfarbe nicht benutzen, wohl aber liegt die Möglichkeit vor, daß sie zwecks Verfälschung zugesetzt werden, um eine große (Anfangs-) Helligkeit vorzutäuschen; das starke, in wenigen Tagen erfolgende Nachlassen würde aber leicht den Betrug aufdecken.

Ebenso würde das Ra F wenig geeignet sein, da seine Aktivität bereits in 136,5 Tagen, also nach $4\frac{1}{2}$ Monaten auf die Hälfte und somit in $1\frac{1}{2}$ Jahren auf 6 Proz. gesunken wäre; ihr Zerfall ist in Tabelle 3 angegeben. Eine Ra F-Leuchtfarbe wäre auch daran zu erkennen, daß sie keine γ -Strahlung und keine Em aussendet. Etwas günstiger liegen die Verhältnisse beim Rd Th, dessen α -Strahlung erst in zwei Jahren auf 50 Proz. und in vier Jahren auf 25 Proz. abnimmt; gerechtfertigt ist seine Verwendung deshalb nur zur Herstellung sehr heller Leuchtfarben, bei welchen man wegen der Zerstörung des Zinksulfids (s. 5. Kapitel) sowieso mit einer sehr geringen Lebensdauer rechnen muß (näheres über Rd Th-Leuchtfarbe s. Abschnitt 3).

Von stärkeren α -Strahlern bleibt somit nur das Ra übrig, das auch bis vor einigen Jahren ausschließlich in der Leuchtfarbenindustrie benutzt wurde. Bei seiner großen Halbwertszeit von 1733 Jahren ist in den Zeiten eines Menschenalters ein merkliches Nachlassen seiner Aktivität nicht zu bemerken (s. Tabelle 4). Man könnte nun daran denken, es durch noch längerlebige Substanzen,

also Io, U oder Th, zu ersetzen. Nun senden aber 59 g Io erst dieselbe α -Strahlenmenge aus wie 1 g Ra (allein); berücksichtigt man ferner, daß das Ra nach einem Monat mit seinen Zerfallsprodukten im Gleichgewicht ist und die ganze Ra-Familie (bis zum

Tabelle 3.
Zerfall von Ra F

Jahre	Aktivität
0,0	100,0
1	83,17
2	69,01
3	57,39
4	47,62
5	39,56
1,0	15,65
1,5	6,19
2,0	2,55
3,0	0,38
4,0	0,06
5,0	0,01

$$\lambda = 1,855 a^{-1}$$

Tabelle 4.
Zerfall des Ra

Jahre	Aktivität
0	100,0
5	99,8
10	99,6
15	99,4
20	99,2
25	99,0
30	98,8
35	98,6
40	98,4
45	98,2
50	98,0
55	97,8
60	97,6
80	96,8 ₅
100	96,1

$$\lambda = 4,0 \cdot 10^{-4} a^{-1}$$

Ra C) nach Tabelle 2 für jedes α -Teilchen $7,35 \cdot 10^5$ Ionen erzeugt, gegenüber nur $1,38 \cdot 10^5$ beim Io (und die Ionenerzeugung ist ja für die Intensität der Radiolumineszenz maßgebend), so können erst $59 \cdot 7,35/1,38 = 314$ g Ionium 1 g Ra in bezug auf die Leuchtkraft ersetzen. Rechnet man nun bei einer hellen Leuchtfarbe mit einem durchschnittlichen Zusatz von 0,1 mg Ra-Element auf 1 g Zinksulfid, so würde eine gleich helle Io-Leuchtfarbe 31,4 mg Io enthalten müssen; man würde also auf verhältnismäßig große Mengen kommen. Die Io-Leuchtfarben senden gleichfalls keine γ -Strahlung aus und liefern auch keine Em.

Noch ungünstiger liegen die Verhältnisse beim U und beim Th; hier würde man unter den angegebenen Bedingungen [durch Multiplikation des Verhältnisses der von 0,1 mg Ra und 1 g U (bzw. Th) ausgesandten α -Teilchen mit ihren Ionisierungsstärken] auf eine Menge

$$\text{von } \frac{3,4 \cdot 10^6}{1,15 \cdot 10^4} \cdot \frac{7,35}{2,53} = 860 \text{ g U bzw. von } \frac{3,4 \cdot 10^6}{4,5 \cdot 10^3} \cdot \frac{7,35}{1,26} = 4400 \text{ g Th}$$

kommen, die man natürlich nicht mehr als Zusatz zu 1 g Zinksulfid geben kann.

Brauchbare Leuchtfarben lassen sich demnach anscheinend nur unter Verwendung von Ra herstellen; es gibt indessen doch noch einen anderen Weg, der auch in den letzten Jahren mit großem Erfolge beschritten ist. Man setzt nämlich dem Zinksulfid eine nicht α -strahlende radioaktive Substanz von nicht zu großer Lebensdauer (etwa einigen Jahren) zu, die ihrerseits einen oder mehrere α -Strahler erzeugt. Eine solche Leuchtfarbe würde anfangs gar nicht leuchten, nach einigen Jahren ein Maximum erreichen und dann wieder nachlassen; um nun von vornherein eine gewisse Leuchtkraft zu haben, fügt man noch einen kurzlebigen α -Strahler bei, der etwa in der Zwischenzeit ebenso schnell zerfällt, wie er von der Grundsubstanz nachgebildet wird. Theoretisch kämen hierfür in Frage MsTh mit Zusatz von RdTh und RaD mit Zusatz von RaF.

b) Radiumleuchtfarben.

Die reinen Ra-Leuchtfarben bestehen nur aus einem Gemisch von Sidotblende und einem Ra-Salz (das natürlich nicht in reiner Form, sondern als Ra-Ba-Salz verwendet wird), in welchem selbstverständlich das einzig Wirksame sein Gehalt an Ra-Metall ist; sein Zerfall ergibt sich aus Tabelle 4. Setzt man die Lebensdauer einer Leuchtfarbe (recht hoch) zu 10 Jahren an, so würde (ohne die inzwischen eingetretene Zerstörung des Zinksulfids, von der in diesem Kapitel durchweg abgesehen werden soll, so daß bei allen hier angestellten Betrachtungen die nicht zutreffende stillschweigende Voraussetzung gemacht wird, daß dieses seine Leuchtfähigkeit unverändert beibehält) die Leuchtkraft in dieser Zeit nur um den völlig zu vernachlässigenden Betrag von 0,4 Proz. fallen. Es ist deshalb eigentlich unverantwortlich, daß das seltene und kostbare Ra, welches für andere Zwecke — es sei nur an wissenschaftliche Untersuchungen und medizinische Bestrahlungen erinnert — so außerordentlich viel wertvoller ist, für diesen doch an sich sehr unbedeutenden Zweck geradezu verschwendet wird, zumal wir in den MsTh-Leuchtfarben einen völlig genügenden Ersatz dafür haben. Eine Wiedergewinnung des Ra ist dabei leider ganz ausgeschlossen, da die winzigen Mengen, welche sich auf Leuchtuhren u. ä. finden, niemals an eine Zentrale zurückströmen und ihre Verarbeitung auch kaum nutzbringend sein dürfte.

Die Ra-Leuchtfarbe nimmt nun während des ersten Monats nach der Herstellung noch beträchtlich an Helligkeit zu, da in dieser Zeit seine Zerfallsprodukte bis einschließlich Ra C entstehen. Der nach Gleichung (4) berechnete Anstieg der Em, welche hierfür maßgebend ist, ist in Tabelle 5 (2. Spalte) und Fig. 8 (ausgezogene Kurve) wiedergegeben (dieser ist auch bestimmend für den Anstieg

Tabelle 5.

Anstieg der Em und der α -Aktivität einer Ra-Leuchtfarbe.

Tage	Em	α -Aktivität	Tage	Em	α -Aktivität
0	0,0	20,0	10	83,4	86,7
1	16,5	33,2	12	88,5	90,8
2	30,2	44,2	14	92,0	93,6
3	41,7	53,4	16	94,4	95,5
4	51,3	61,0	18	96,1	96,9
5	59,0	67,2	20	97,3	97,8
6	66,0	72,8	25	98,9	99,1
7	71,7	77,4	30	99,6	99,7
8	76,3	80,8	40	99,9	99,9
9	80,2	84,2	60	100,0	100,0

$$\lambda = 0,180 d^{-1}$$

der γ -Aktivität, die ja von Ra C herrührt); gemäß dieser haben sich nach einer Woche bereits 72 Proz., nach zwei Wochen 92 Proz. der Gleichgewichtsmenge angesammelt. Bei der Berechnung der Helligkeit muß man indessen berücksichtigen, daß das Ra selbst auch α -Strahlen aussendet, deren Ionisierungswirkung den $\frac{1,45}{5,90} = 0,246$ ten

Teil, also rund ein Viertel von der der Zerfallsprodukte ausmacht. Danach ergibt sich der in Tabelle 5 (3. Spalte) und Fig. 8 (gestrichelte Kurve) dargestellte Anstieg der α -Aktivität, nach den Gleichungen (9) und (4) zu

$$J = K \cdot \lambda_{Ra} \cdot Ra + \lambda_{Em} \cdot Em = K \cdot \lambda_{Ra} \cdot Ra + \lambda_{Ra} \cdot Ra \cdot (1 - e^{-\lambda_{Em} \cdot t})$$

oder

$$J \sim K + (1 - e^{-\lambda_{Em} \cdot t}),$$

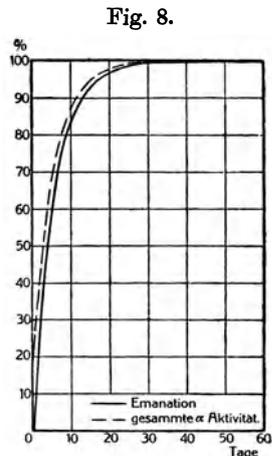
wo $K = 0,25$ ist. Die α -Aktivität und — unter den genannten eingeschränkten Voraussetzungen — auch die Helligkeit würde somit nach einer Woche 77 Proz., nach zwei Wochen 94 Proz. der größten Leuchtkraft betragen.

Die weiteren Zerfallsprodukte, namentlich das Ra D und damit auch der einzige noch auftretende α -Strahler, das Ra F, entstehen nur so langsam, daß ihre Helligkeitverstärkende Wirkung praktisch kaum noch in Frage kommt; die γ -Strahlung wird hierdurch gar nicht beeinflusst, da Ra D und E nur sehr weiche γ -Strahlen aussenden, welche zur Messung nichts beitragen. Die nach Gleichung (9) berechnete Menge von Ra F, welche sich aus 100 g Ra bildet, ist in Tabelle 6 (2. Spalte) mitgeteilt. Die α -Aktivität des Ra, einschließlich des Ra F, ergibt sich (Tabelle 6, 3. Spalte) nach Gleichung (10) zu

$$\lambda_{\text{Ra}} \cdot \text{Ra} + K \cdot \lambda_{\text{F}} \cdot \text{Ra F},$$

wo $K = \frac{1,60}{7,35}$ ist; der Gewinn beträgt

also in den ersten 5 Jahren nur knapp 4 Proz., in 10 Jahren etwa 7 Proz. und würde sein Maximum nach 70 Jahren mit $17\frac{1}{2}$ Proz. erreichen.



Anstieg der Em und der α -Aktivität einer Ra-Leuchtfarbe.

Tabelle 6.

Bildung von Ra F und Anstieg der α -Aktivität einer Ra-Leuchtfarbe (unter Berücksichtigung des Ra F).

Jahre	Ra F aus 100 g Ra	α -Aktivität	Jahre	Ra F aus 100 g Ra	α -Aktivität
0	0,000 00	100,0	20	0,012 24	111,6
1	00 48	100,5	30	15 43	114,4
2	01 32	101,2	40	17 49	116,0
3	02 12	102,0	50	18 88	117,0
4	02 96	102,8	60	19 60	117,4
5	03 76	103,9	80	20 40	117,4
10	07 42	107,1	100	20 64	116,9

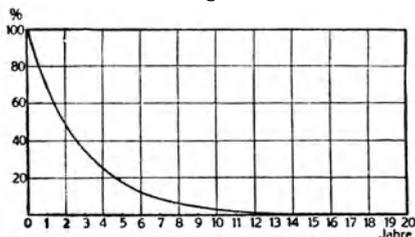
$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Ra}} &= 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1} \\ \lambda_{\text{Em}} &= 65,70 \cdot \text{ a}^{-1} \\ \lambda_{\text{D}} &= 0,04333 \cdot \text{ a}^{-1} \\ \lambda_{\text{E}} &= 52,19 \cdot \text{ a}^{-1} \\ \lambda_{\text{F}} &= 1,855 \cdot \text{ a}^{-1} \end{aligned}$$

Die Herstellung von Leuchtfarben aus RaD hat im wesentlichen nur theoretisches Interesse, da dieses Isotop zum Blei und folglich von ihm nicht abtrennbar ist, so daß sich die 1 g Ra entsprechende Gleichgewichtsmenge von 8 mg RaD in 130 bis 660 kg Blei verteilt befindet; es käme deshalb nur eine Gewinnung aus alten Ra-Präparaten in Frage, die aber wegen der unvermeidlichen Verluste nicht empfehlenswert ist.

c) Radiothorleuchtfarben.

Der Zerfall und damit auch die Abnahme der α -Aktivität einer nur RdTh als radioaktive Substanz enthaltenden Leuchtfarbe ist in Tabelle 7 und Fig. 9 mitgeteilt.

Fig. 9.



Zerfall von RdTh.

Würde sich das mit dem RdTh im Gleichgewicht befindliche ThX zugleich lösen und somit auch der Leuchtfarbe bei der Herstellung mit zugesetzt werden, so hätte sie nahezu sogleich ihre volle Helligkeit, da die übrigen Zerfallsprodukte nach etwa drei Tagen im Gleichgewicht wären. Nun wird aber die gemachte Voraussetzung kaum zutreffen, denn das RdTh ist Isotop mit dem Th, das ThX dagegen mit dem Ra, und somit werden ihre Löslichkeiten recht verschieden sein. Es wird deshalb das ThX und dementsprechend auch die α -Aktivität, ganz analog wie bei einer Ra-Leuchtfarbe, erst im Laufe eines Monats zu dem Gleichgewichtswert ansteigen (s. Tabelle 8; der Faktor K in

der Gleichung S. 52 hat hier den Wert $\frac{1,61}{8,14} = 0,198$, also rund $\frac{1}{5}$).

Der Anstieg des ThX ist auch maßgebend für die γ -Strahlung des RdTh, die ja vom ThC ausgeht.

Da die Th-Familie kein dem RaF entsprechendes Zerfallsprodukt aufweist, so kommt ein weiterer Anstieg der Aktivität bei der RdTh-Leuchtfarbe nicht in Frage.

Es bleibt noch zu untersuchen, wie sich die Helligkeit einer reinen RdTh- zu der einer Ra-Leuchtfarbe, beide im Gleichgewicht mit ihren Zerfallsprodukten, verhält. Unter Voraussetzung gleicher Ausnutzung der γ -Strahlen von RaC und ThC bei der Messung und unter der Annahme, daß 1 γ -Äquivalent RdTh dieselbe Zahl

Tabelle 7.
Aktivität einer
Rd Th-Leuchtfarbe.

Jahre	Aktivität
0	100,0
0,1	96,6
0,2	93,3
0,3	90,2
0,4	87,1
0,5	84,1
1,0	70,7
1,5	59,5
2,0	50,0
2,5	40,2
3,0	35,4
4	25,0
5	17,7
6	12,5
8	6,2
10	3,1
15	0,55
20	0,1

$$\lambda = 0,3466 \text{ a}^{-1}$$

Tabelle 8.
Anstieg des Th X und der α -Aktivität
einer Rd Th-Leuchtfarbe.

Tage	Th X	α -Aktivität
0	0,0	16,7
1	17,3	31,1
2	31,6	43,0
3	43,4	52,7
4	53,2	61,0
5	61,3	67,6
6	68,0	73,3
7	73,5	77,9
8	78,1	81,7
9	81,9	84,9
10	85,0	87,5
12	89,9	91,5
14	93,0	94,4
16	95,2	96,1
18	96,7	97,2
20	97,8	98,1
25	99,1	99,4
30	99,7	99,7
40	99,9 ₄	99,9 ₇
50	100,0	100,0

$$\lambda = 0,190 \text{ d}^{-1}$$

von α -Teilchen aussendet, wie 1 γ -Äquivalent Ra, würde eine Rd Th-Leuchtfarbe mit einem Gehalt (s. Tabelle 1) von $\frac{7,35}{9,75} = 0,754$ γ -Äquivalent dieselbe Helligkeit haben wie eine Leuchtfarbe mit 1 γ -Äquivalent Ra. Nun sind aber die γ -Strahlen des Th C durchdringender als die des Ra C und es wird deshalb die Rd Th-Menge und damit auch die von ihr erzeugte Leuchtkraft größer sein als sich aus der γ -Strahlenmessung ergeben würde; man wird also zur Erzielung derselben Helligkeit scheinbar mit einer kleineren Rd Th-Menge auskommen. Setzt man die Ionenerzeugungen proportional den Absorptionskoeffizienten, so wäre das Verhältnis beider, wenn man die Werte für Blei (Tabelle 2) nimmt, $\frac{0,462}{0,495} = 0,934$, bei Benutzung derer für Aluminium $\frac{0,096}{0,115} = 0,835$, und danach die notwendige Rd Th-Menge 70,4 bzw. 63 Proz. des γ -Äquivalents von Ra.

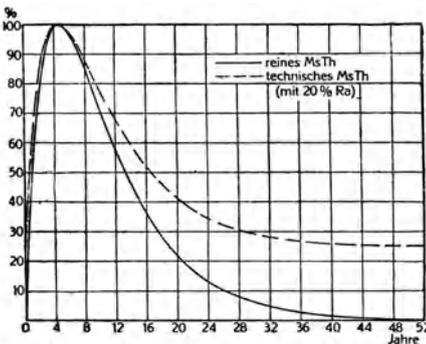
Man wird somit nur rund $\frac{2}{3}$ γ -Äquivalent RdTh zur Erzielung derselben Helligkeit brauchen wie beim Ra, was auch durch unsere Messungen an zwei in gleicher Weise aus demselben Zinksulfid hergestellten Leuchtfarben mit einem Gehalt von 0,1 mg Ra und 0,066 mg RdTh/g Zinksulfid bestätigt wird. Die Messungen mit dem Bothe-Apparat an der fertigen Leuchtfarbe lieferten die (wie in der Regel) kleineren Werte 0,0878 und 0,0554, im Verhältnis also 1:0,63 (dieser Unterschied kann sehr wohl durch die andere Meßanordnung bedingt sein). Ihre Helligkeiten (in willkürlichem Maße) waren bei gleicher Schichtdicke und Zusammenpressung 36,9 und 35,5, also innerhalb der Fehlergrenze identisch (wenn man nicht die um 4 Proz. geringere Helligkeit der RdTh-Leuchtfarbe als reell ansehen will). Es ergibt sich somit, daß man zur Erzielung gleicher Helligkeiten rund $\frac{2}{3}$ soviel RdTh wie Ra (γ -Äquivalente bei der üblichen Meßanordnung) gebraucht, was auch sonst durch die Praxis bestätigt wird*).

d) Mesothorleuchtfarben.

1. Reine Mesothorleuchtfarben.

Da sowohl $MsTh_1$ wie $MsTh_2$ keine α -Strahlen aussenden, so würde eine reine $MsTh$ -Leuchtfarbe zunächst nicht leuchten; ihre

Fig. 10.



Anstieg der α -Aktivität einer $MsTh$ -Leuchtfarbe.

Helligkeit wird sich also in demselben Maße wie die Bildung des RdTh, die nach Gleichung (7) zu berechnen ist, entwickeln (s. Tabelle 9, 2. Spalte und Fig. 10, ausgezogene Kurve). Die reinen $MsTh$ -Leuchtfarben sind praktisch verwendbar, wenn man ein etwa 2 Jahre altes Präparat benutzt; sie würden dann in etwa $2\frac{1}{2}$ Jahren noch um 29 Proz. an Helligkeit zunehmen, nach 7 Jahren auf ihren Anfangswert gesunken sein und nach 10 Jahren immer noch $\frac{3}{4}$ desselben aufweisen. Da nun aber das $MsTh_2$ selbst γ -Strahlen aussendet,

*) F. Bahr, Elektrot. ZS. 40, 299, 1919.

Tabelle 9.

Anstieg der α -Aktivität einer Ms Th-Leuchtfarbe.

Jahre	Reines Ms Th	Technisches Ms Th	Jahre	Reines Ms Th	Technisches Ms Th
0	0	25,4	7	91,3	93,7
0,25	14,7	36,2	8	85,0	88,8
0,5	27,5	45,5	9	78,0	83,7
1	49,4	62,4	10	70,7	76,9
1,5	65,3	74,1	12	57,0	67,9
2	77,6	83,3	14	45,7	59,3
2,5	86,9	90,3	16	36,3	52,3
3	93,3	94,9	18	28,5	46,3
3,5	97,2	97,8	20	22,1	41,6
4	99,2	99,6	25	11,8	34,0
4,5	100,0	100,0	30	6,4	29,3
5	99,7	99,9	40	1,5	25,9
6	96,8	97,7	50	0,5	25,2

$$\lambda_M = 0,126_8 \text{ a}^{-1}$$

$$\lambda_R = 0,346_8 \text{ a}^{-1}$$

$$\lambda_{Ra} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$$

so folgt die durch die γ -Strahlung gemessene Aktivität einem anderen Gesetz und wird auch in anderer Weise ansteigen. Sie ergibt sich nach Gleichung (10) zu

$$J = \lambda_M \cdot M + K \cdot \lambda_{Ra} \cdot Rd,$$

wo nach Gleichung (7)

$$Rd = M_0 \cdot \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_{Ra}} \cdot (e^{-\lambda_M t} - e^{-\lambda_{Ra} t})$$

und nach Gleichung (1)

$$M = M_0 \cdot e^{-\lambda_M t}$$

ist. Nun kann man für den Koeffizienten K keinen für alle Meßanordnungen eindeutigen Wert angeben. Beim Bothe-Apparat wird man vielleicht wieder die vorher benutzte Beziehung verwenden dürfen. Es wäre dann

$$K = 0,462/0,620 = 0,75 \text{ für Blei}$$

und

$$K = 0,096/0,116 = 0,83 \text{ für Aluminium.}$$

Bei Messungen mit dem großen Plattenkondensator wird man eher die reziproken Werte, für Blei also 1,33 nehmen*). Es ist

*) Nach Angabe von Meyer und v. Schweidler, Radioaktivität, S. 405, trifft noch besser der Wert 1,5 hin.

Tabelle 10.
 Zerfall des MsTh, Bildung des RdTh und γ -Strahlung von MsTh (+ Zerfallsprodukte).

Jahre	Zerfall des MsTh	Bildung des RdTh	$\frac{\lambda_{Rd}}{\lambda_M}$ RdTh	γ -Strahlung von reinem MsTh + Zerfallsprodukte				Techn. MsTh	
				K = 0,8	K = 1,0	K = 1,3	K = 1,5	K = 0,8	K = 1,5
0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,25	98,6	3,0	8,2	105,2	106,9	109,3	110,9	104,2	102,7
0,5	93,8	5,6	15,1	106,1	109,3	113,9	116,9	105,9	113,5
1	88,1	10,1	27,7	110,3	115,7	123,1	129,6	108,6	123,7
1,5	82,7	13,3	36,4	111,8	118,9	130,0	137,4	109,4	129,9
2	77,5	15,8	43,3	112,0	120,7	133,7	142,4	109,6	133,9
2,5	72,8	17,7	48,5	111,6	121,3	135,8	145,5	109,3	136,4
3	68,4	19,0	52,0	110,0	120,4	136,1	146,5	108,0	137,2
3,5	64,2	19,8	54,2	107,6	118,4	134,1	144,7	106,1	135,8
4	60,2	20,2	55,4	104,5	115,5	132,1	143,2	103,6	134,6
4,5	56,4	20,3 ⁴	55,7	100,6	112,0	128,7	139,8	100,5	131,8
5	53,0	20,3	55,6	97,4	108,5	125,2	136,4	97,9	129,1
6	46,8	19,7	54,0	88,7	100,7	117,0	127,8	90,9	122,2
7	41,2	18,6	51,0	81,9	92,0	107,3	117,5	85,4	113,9
8	36,3	17,3	47,4	74,1	83,6	97,8	107,3	79,2	105,8
9	32,0	15,9	43,6	66,9	75,6	88,6	97,4	73,4	97,8
10	28,2	14,4	38,5	59,7	67,7	78,7	87,4	67,7	89,8
12	21,8	11,6	31,8	46,5	52,8	62,3	68,7	57,1	74,9
14	17,0	9,3	25,5	36,4	42,4	50,1	55,2	49,0	64,1
16	13,2	7,4	20,3	29,4	33,4	39,0	43,5	43,4	54,6
18	10,3	5,8	15,9	23,0	26,2	30,9	34,1	38,2	47,1
20	8,0	4,5	12,3	17,9	20,3	24,0	26,5	34,2	41,0
25	4,2	2,4	6,6	9,4	10,7	12,7	14,0	27,4	31,0
30	2,2	1,3	3,6	5,4	5,7	6,8	7,5	24,1	25,8
40	0,6	0,3	0,8	1,3	1,4	1,6	1,8	20,7	21,1
50	0,2	0,1	0,3	0,4	0,5	0,5 _g	0,6	19,9	20,1

$\lambda_M = 0,126, a^{-1}$
 $\lambda_R = 0,346, a^{-1}$
 $\lambda_{Ra} = 4,0 \cdot 10^{-4} a^{-1}$

deshalb in Tabelle 10 und Fig. 11 der Anstieg der γ -Aktivität für die Werte $K = 0,8, 1,0, 1,3$ und $1,5$ berechnet, wobei die Anfangsaktivität des reinen MsTh gleich 100 gesetzt ist (außerdem enthält die Tabelle noch den Zerfall des MsTh, die daraus entwickelte Menge RdTh, sowie die Werte für $\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_M} \cdot RdTh$). Wenn

man also nicht für seine Meßanordnung experimentell den Wert von K ermittelt hat, so ist es unmöglich, durch Verfolg des Verlaufes der γ -Aktivität das Alter einer MsTh-Leuchtfarbe zu bestimmen, da, je nach dem Wert von K , das Maximum zu ganz verschiedenen Zeiten — dieselben schwanken zwischen zwei und drei Jahren — erreicht wird und ferner auch die Größe des Anstieges von 12 bis 46,5 Proz. variiert.

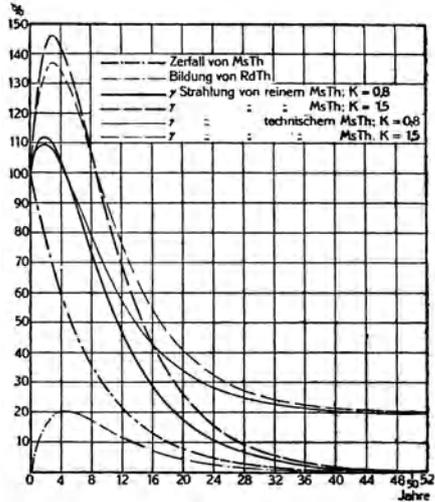
Dieselben Schwierigkeiten treten nun auch durch den Vergleich von MsTh mit Ra auf, und es lassen sich überhaupt keine exakten Angaben machen, wenn nicht das Alter des MsTh und die Meßanordnung genau definiert sind. Unter der

Voraussetzung, daß das Gesetz des radioaktiven Gleichgewichtes $\lambda_1 Z_1 = \lambda_2 Z_2$ auch für Substanzen verschiedener Familien gilt, würde sich unter Vernachlässigung der verschiedenen Absorptionsfähigkeiten der γ -Strahlen von RaC und MsTh₂ das Gewichtsverhältnis von frischem MsTh zu Ra wie

$$1 : \frac{4,0 \cdot 10^{-9}}{1,26 \cdot 10^{-11}} \cdot \frac{226}{232} = 1 : 309$$

ergeben und es würde somit 1 g frisches MsTh (γ -Äquivalent) an Gewicht nur 3,2 mg enthalten. Da die Absorptionskoeffizienten der γ -Strahlen, wenigstens für Aluminium, nicht sehr verschieden sind, so wird man die Beziehung, daß 300 mg Ra 1 mg Gewicht MsTh in bezug auf die γ -Strahlung äquivalent sind, als erste, aller-

Fig. 11.



Zerfall des MsTh, Bildung des RdTh und γ -Strahlung von MsTh.

dings sehr grobe Annäherung nehmen können; bei reifem MsTh muß man dagegen diese Menge, wegen der zwei γ -Strahler beim MsTh, etwa verdoppeln. In bezug auf die α -Wirkung ergibt sich das Verhältnis dagegen zu

$$1 : \frac{4,0 \cdot 10^{-9}}{1,26 \cdot 10^{-11}} \cdot \frac{9,75}{7,35} \cdot \frac{226}{232} = 1 : 404.$$

Noch komplizierter werden die Beziehungen dadurch, daß das technisch gewonnene MsTh immer noch eine gewisse Menge Ra enthält, und zwar kann man den Prozentsatz bei den in Deutschland meist verarbeiteten Thorerzen zu 20 Proz. γ -Äquivalent (bezogen auf frisches MsTh) ansetzen; dies würde etwa 10 Proz. γ -Äquivalent für MsTh im Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten entsprechen. Vernachlässigt man wieder die Unterschiede der Absorptionfähigkeiten der γ -Strahlen von Ra und MsTh und wählt man für K die beiden Extremwerte 0,8 und 1,5, so würde sich der in den beiden letzten Spalten der Tabelle 10 und in Fig. 11 mitgeteilte Anstieg der γ -Aktivität ergeben (wobei noch der Zerfall des Ra mit berücksichtigt ist). Die Berechnung erfolgt nach der Gleichung

$$J = 20 \cdot e^{-\lambda_{\text{Ra}} \cdot t} + 80 \left[e^{-\lambda_{\text{M}} \cdot t} + K \cdot \frac{\lambda_{\text{Rd}}}{\lambda_{\text{M}}} \cdot \text{RdTh} \right]$$

$$\sim 25 \cdot e^{-\lambda_{\text{Ra}} \cdot t} + 100 \left[e^{-\lambda_{\text{M}} \cdot t} + K \cdot \frac{\lambda_{\text{Rd}}}{\lambda_{\text{M}}} \cdot \text{RdTh} \right],$$

wo RdTh die nach Gleichung (7) aus 1 g MsTh gebildete Menge von RdTh ist. Bei gleicher Anfangsintensität ist der Verlauf der Kurven der γ -Aktivität gegenüber dem reinen MsTh etwas abgeflacht.

Die Berechnung der α -Aktivität gestaltet sich insofern sicherer, als ja das Verhältnis der Ionisationswirkung des Ra und des RdTh bekannt sind, doch liegt auch hier wieder die Schwierigkeit im γ -Äquivalent. Vernachlässigt man, wie vorher, die Verschiedenheit der Absorptionsvermögen der γ -Strahlen von Ra und MsTh, so würde sich die α -Aktivität analog wie vorher ergeben zu

$$J = 25 \cdot e^{-\lambda_{\text{Ra}} \cdot t} + 100 \cdot K \cdot \frac{\lambda_{\text{Rd}}}{\lambda_{\text{M}}} \cdot \text{RdTh}$$

oder

$$J = \frac{25}{K} \cdot e^{-\lambda_{\text{Ra}} \cdot t} + 100 \cdot \frac{\lambda_{\text{Rd}}}{\lambda_{\text{M}}} \cdot \text{RdTh}^*).$$

* Die Größe $\left(100 \cdot \frac{\lambda_{\text{Rd}}}{\lambda_{\text{M}}} \cdot \text{RdTh} \right)$ kann man aus Tabelle 10, 3. Spalte entnehmen.

In dieser hat K den Wert $\frac{9,75}{7,35}$ und somit ist $1/K = 0,754$.

Der Anstieg der α -Aktivität einer Leuchtfarbe mit technischem MsTh ist in Tabelle 9 (letzte Spalte) und Fig. 10 (gestrichelte Kurve) wiedergegeben. Verwendet man auch hier ein 2 Jahre altes Präparat, so wächst die Aktivität in den nächsten $2\frac{1}{2}$ Jahren noch um 20 Proz., sinkt in 7 Jahren wieder auf seinen Anfangswert und beträgt nach 10 Jahren 82 Proz. desselben. Es lassen sich also auch mit dem technischen MsTh Leuchtfarben herstellen, die eine für die Praxis genügend lange Aktivität besitzen.

2. Leuchtfarben aus Mischung von Mesothor und Radiothor.

Immerhin ist es aber unangenehm, daß man die Präparate zwei Jahre lang liegen lassen muß, ehe man sie in Gebrauch nehmen kann. Man setzt deshalb dem MsTh von vornherein einen gewissen Betrag von RdTh zu, den man am besten so wählt, daß die Helligkeit nach fünf Jahren etwa denselben Wert wie zu Anfang hat. Die α -Strahlung eines Gemisches ergibt sich aus der Gleichung

$$J = 25 \cdot 0,754 \cdot e^{-\lambda_{Ra} t} + x \cdot K' \cdot 125 \cdot e^{-\lambda_{Ra} t} + 100 \cdot \frac{\lambda_{Rd}}{\lambda_M} \cdot RdTh,$$

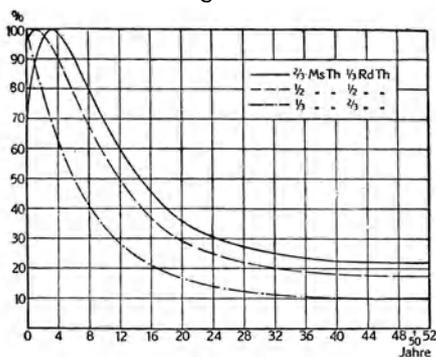
wobei x angibt, wie viel Teile γ -Äquivalent RdTh auf 1 γ -Äquivalent technisches MsTh zugesetzt sind, und K' , je nach der Meßanordnung zwischen $\frac{1}{0,8}$ und $\frac{1}{1,5}$

schwankt. Da man nun radioaktive Präparate außerhalb des Kondensators mißt, so soll hier nur der Fall $K' = \frac{1}{1,5}$ behandelt werden.

In Tab. 11 u. Fig. 12 sind die α -Aktivitäten für Gemische aus $\frac{2}{3}$ MsTh + $\frac{1}{3}$ RdTh, $\frac{1}{2}$ MsTh + $\frac{1}{2}$ RdTh und $\frac{1}{3}$ MsTh + $\frac{2}{3}$ RdTh (also für $x = \frac{1}{2}, 1, 2$) berechnet worden. Mit einem Zusatz

von $\frac{1}{3}$ RdTh wächst die α -Aktivität in den ersten 3 Jahren um 40 Proz. und erreicht nach 10 Jahren den Anfangswert wieder.

Fig. 12.



α -Aktivität von technischem MsTh und RdTh.

Tabelle 11.
 α -Aktivität von technischem MsTh + RdTh.

Jahre	$\frac{2}{3}$ MsTh + $\frac{1}{3}$ RdTh	$\frac{1}{2}$ MsTh + $\frac{1}{2}$ RdTh	$\frac{1}{3}$ MsTh + $\frac{2}{3}$ RdTh
0	70,8	97,0	100,0
0,25	76,2	98,0	96,8
0,5	80,7	98,7	93,8
1	88,8	100,0	88,5
1,5	93,5	99,4	83,2
2	96,9	98,5	78,3
2,5	98,3	97,0	73,9
3	100,0	95,1	69,6
3,5	99,6	92,6	65,8
4	98,9	90,2	62,4
4,5	97,1	87,4	59,1
5	95,6	84,6	56,0
6	91,2	79,0	50,4
7	85,8	73,0	45,2
8	80,4	67,8	41,2
9	75,2	62,8	37,6
10	69,3	57,2	33,7
12	60,0	49,3	28,7
14	52,0	42,6	24,5
16	45,8	37,4	21,4
18	40,4	32,9	18,7
20	36,3	29,5	16,8
25	29,6	24,0	13,6
30	26,4	21,4	12,2
40	22,6	18,3	10,4
50	22,0	17,8	10,1

Bei einer Leuchtfarbe, die aus gleichen Teilen MsTh und RdTh besteht, nimmt sie in den ersten Jahren nur noch um 3 Proz. zu und ist nach etwa $2\frac{1}{4}$ Jahren auf den Anfangswert und nach 5 Jahren auf 87 Proz. gesunken, bei $\frac{2}{3}$ RdTh tritt dagegen ein sofortiger Abfall ein*). Theoretisch wird man deshalb einen Zusatz von $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ RdTh wählen.

Die γ -Strahlung eines Gemisches berechnet sich aus der Formel

$$25 \cdot e^{-\lambda_{\text{Ra}} t} + x \cdot 125 \cdot K' \cdot e^{-\lambda_{\text{Ra}} t} + 100 \cdot \left[M + K \cdot \frac{\lambda_{\text{Rd}}}{\lambda_M} \cdot \text{RdTh} \right].$$

*) Sollte sich der Wert K' ändern, so bleibt die Tabelle auch noch richtig, wenn man x einen entsprechenden Wert beilegt, so daß sich dann nur ein anderes Mischungsverhältnis ergeben würde.

Tabelle 12.
 γ -Strahlung von technischem MsTh + RdTh.
 $K' = 1$; $K = 1,5$.

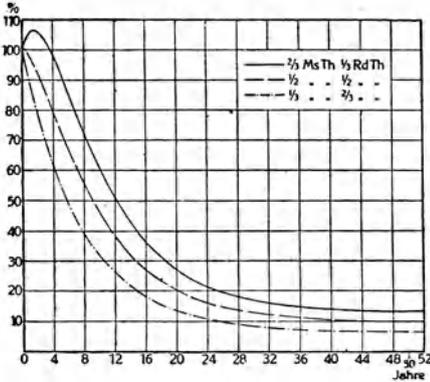
Jahre	$\frac{2}{3}$ MsTh + $\frac{1}{3}$ RdTh	$\frac{1}{2}$ MsTh + $\frac{1}{2}$ RdTh	$\frac{1}{3}$ MsTh + $\frac{2}{3}$ RdTh
0	100,0	100,0	100,0
0,25	103,1	100,2	97,1
0,5	103,7	98,8	93,9
1	106,1	97,2	88,4
1,5	106,5	94,7	83,0
2	106,0	92,0	78,0
2,5	104,5	88,3	74,1
3	103,4	86,3	69,3
3,5	100,5	82,7	64,9
4	98,0	79,8	61,5
4,5	94,9	76,5	58,5
5	92,0	73,4	54,3
6	85,6	67,3	48,5
7	78,8	61,2	43,5
8	72,6	56,0	39,4
9	66,7	51,2	35,6
10	61,0	46,5	32,0
12	50,5	38,2	26,0
14	43,0	32,4	21,9
16	36,6	27,5	18,5
18	31,5	23,7	15,8
20	27,4	20,4	13,8
25	20,7	15,5	10,3
30	17,2	12,9	8,6
40	14,1	10,6	7,0
50	13,4	10,0	6,7

Dabei ist $K = 1,5$, während K' den Wert 1 hat, da ja hier unter RdTh diejenige Menge verstanden wird, welche dieselbe γ -Strahlung wie das MsTh liefert. Bei $\frac{1}{3}$ RdTh Zusatz (s. Tabelle 12 und Fig. 13) würde die γ -Aktivität 1,5 Jahre, bei $\frac{1}{2}$ RdTh aber nur noch $\frac{1}{4}$ Jahr lang unwesentlich zunehmen, während sie bei $\frac{2}{3}$ RdTh-Zusatz sofort fallen würde, und zwar, wie immer, zu Anfang rascher, zum Schluß langsamer.

Nach diesen Erörterungen würde man bei Leuchtfarben aus 0,05 mg technischem MsTh und 0,05 g RdTh, die also aus 0,01 g Ra, 0,04 g MsTh und 0,05 g RdTh bestehen, eine Anfangsaktivität

entsprechend der von $0,01 + 0,05/0,66 = 0,085$ mg Ra erwarten dürfen; sie müßte also eine um rund 15 Proz. geringere Helligkeit als eine Ra-Leuchtfarbe mit 0,1 mg bzw. eine Rd Th-Leuchtfarbe mit 0,066 mg Gehalt haben.

Fig. 13.



γ -Strahlung von technischem MsTh und RdTh.

Nun wurde an einer Leuchtfarbe der angegebenen Zusammensetzung zugleich mit der vorher erwähnten Ra-Leuchtfarbe von 0,1 mg die Helligkeiten 33,7 und 36,9 beobachtet; die Ra-Leuchtfarbe ergab sich also um 9 Proz. heller. Innerhalb der Fehlergrenze der Messung und vor allem der Rechnungen kann man die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Theorie als befriedigend ansehen.

e) Die Herstellung von Leuchtfarben.

Da die α -Teilchen von allen Substanzen, einschließlich der Luft, stark absorbiert werden, genügt es nicht, die radioaktiven Präparate mit dem Zinksulfid zu vermischen, man muß vielmehr dafür sorgen, daß sich die Radiummoleküle den komplexen Zentren der Sidotblende soweit wie möglich nähern. Zu diesem Zweck bringt man eine durch ihr Gewicht oder besser durch ihre γ -Strahlung dosierte Menge eines Radiumsalzes in Lösung und setzt diese dem abgewogenen Zinksulfid zu. Für praktische Zwecke wird man nicht über einen Gehalt von 0,2 mg Ra/g Zinksulfid, entsprechend 0,13 mg Rd Th hinausgehen, während andererseits Leuchtfarben mit $1/200$ dieser Menge oder noch weniger in den Handel gebracht werden. Für die Haltbarkeit der Leuchtfarbe hat es sich als außerordentlich wichtig herausgestellt, das Ra-Ba-Salz von allen etwa noch darin enthaltenen Verunreinigungen zu befreien. Das feuchte, vom Ra durchsetzte Zinksulfid wird dann vorsichtig unter Umrühren mit einem Glasstabe getrocknet, wobei man darauf zu achten hat, daß nicht etwa die Kristalle durch Druck zerstört werden, weil damit ihre Radio- (wie auch ihre Photo-) Lumineszenz stark verringert werden würde. Die Leuchtfarbe muß selbstverständlich in

verschlossenen Gefäßen aufbewahrt werden, damit sich die ja wesentlich zur Leuchtkraft beitragende Emanation und ihre Zerfallsprodukte in ihr ansammeln können.

Von anderer Seite ist auch vorgeschlagen worden, wasserunlösliche Salze (Carbonat und Sulfat) zu nehmen, mit der Begründung, daß diese die Em besser zurückhalten. Durch eine rein mechanische Mengung erzielt man aber eine wesentlich geringere Helligkeit (s. 5. Kapitel), so daß das erstere Verfahren und Gebrauch der Leuchtfarbe unter gasdichtem Abschluß entschieden vorzuziehen ist.

5. Kapitel.

Prüfung und Messung der Leuchtfarben.

a) Helligkeit der Leuchtfarben.

Die Untersuchung der Helligkeit der Leuchtfarben wird sich zunächst auf die Abhängigkeit von einer Reihe von Faktoren, wie Schichtdicke, Zusammenpressung (also dem Gehalt an Gramm radioaktiver Substanz/cm² leuchtender Fläche bei gegebener Schichtdicke) und Ra-Gehalt erstrecken müssen, und erst wenn diese festliegen, wird man an eine absolute Photometrie in HK oder Lux denken können. Weiterhin wäre zu untersuchen die Helligkeit radiolumineszierender Schirme, der Einfluß einer Vorbelichtung und schließlich die allmähliche Abnahme der Helligkeit infolge der Zerstörung des Zinksulfides.

1. Einfluß der Schichtdicke.

Die ersten Messungen über den Einfluß der Schichtdicke von F. Bahr¹⁾ führten zu den in Tabelle 13 wiedergegebenen Werten, nach welchen sich scheinbar eine günstigste Dicke von 0,17 mm ergibt. Sie hängt naturgemäß von dem verwendeten Zinksulfid ab und ist eine Funktion seiner Korngröße. Nun ist es ja klar, daß ein Optimum existieren muß, da die α -Strahlen aus den beiden äußersten Schichten, deren Dicke gleich der Reichweite ist, nur zum Teil (immerhin mehr als zur Hälfte) ausgenutzt werden. Nimmt man das Raumgewicht des Zinksulfids zu 4 an, so ergibt sich die Reichweite zu $3,7 \cdot 10^{-2}$ mm, so daß etwa auf jeder Seite

Tabelle 13.

Abhängigkeit der Helligkeit von der Schichtdicke nach den Beobachtungen von Bahr.

Schichtdicke	Helligkeit	Helligkeit/Dicke
0,078	0,17	2,18
111	27 ₅	48
140	36	57
169	44	60
208	52	50
250	58	32

1.10⁻² mm, insgesamt also 2.10⁻² mm, nicht ausgenutzt werden; das Optimum müßte also bei wesentlich geringeren Werten als 0,17 mm auftreten. Ein weiterer Beweis ergibt sich auch aus der

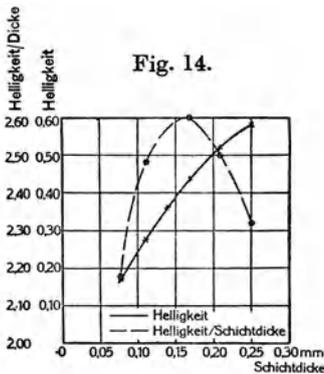


Fig. 14.

Abhängigkeit der Helligkeit von der Schichtdicke nach Bahr.

graphischen Darstellung (Fig. 14), denn naturgemäß müßte die Kurve für die Schichtdicke 0 auch die Helligkeit 0 ergeben, was sie aber nicht tut (vorausgesetzt ist allerdings dabei, daß die Leuchtfarbe möglichst feinpulvrig ist).

Unsere eigenen Messungen wurden so angestellt, daß in Küvetten von 1 cm² Fläche die abgewogene Leuchtfarbe (mit 0,2 mg Ra/g Zinksulfid) durch einen genau passenden Glasstempel auf die gewünschte Dicke zusammengepreßt wurde*). Bei der ersten Versuchsreihe mit 0,03 g Leuchtfarbe/0,1 mm (Tabelle 14; Fig. 15, ausgezogene Kurve) wächst die Helligkeit bis zu 0,25 mm proportional der Schichtdicke und bleibt von 0,50 mm ab konstant (dieser End-

*) Dabei fiel (wegen des etwas verschiedenen Flächeninhaltes der Küvetten) die Menge für 0,1 mm Schichtdicke nicht gleichmäßig aus; deshalb wurde die Schichtdicke dieserhalb korrigiert, und zwar einfach proportional der Menge der Leuchtfarbe angesetzt, was zulässig ist, da die Helligkeit zu Anfang proportional der Schichtdicke ist (bei größeren Werten wäre eine Korrektur überflüssig gewesen, da jene dann unabhängig von der Dicke der leuchtenden Schicht ist).

wert wurde gleich 100 gesetzt), eine solche Schicht würde also praktisch schon als unendlich dick gelten; dazwischen erfolgt ein allmählicher Übergang, während eine optimale Schichtdicke sich nicht ergibt. Bei einer Menge von 0,05 g derselben Leuchtfarbe/0,1 mm ist die anfängliche Proportionalität nicht so gut aus-

Tabelle 14.

Abhängigkeit der Helligkeit von der Schichtdicke bei 0,03 g Leuchtfarbe/0,1 mm Dicke.

Schichtdicke		Helligkeit		
beobachtet	korrigiert	beobachtet	ausgeglichen	Differenz
0,06	0,08 ₄	29,6	26,9	— 2,7
12	13 ₃	43,6	45,3	+ 1,7
15	16 ₆	61,2	58,0	— 3,2
20	20	65,2	67,6	+ 2,4
25	26	86,4	86,0	+ 0,4
30	31	89,1	93,5	+ 4,4
40	40	99,8	99,0	— 0,8
50	50	99,7	99,8	+ 0,1
61	61	100,1	100,0	— 0,1
73	70	99,7	100,0	+ 0,3
85	87	99,5	100,0	+ 0,5
98	97	100,3	100,0	— 0,3

Tabelle 15.

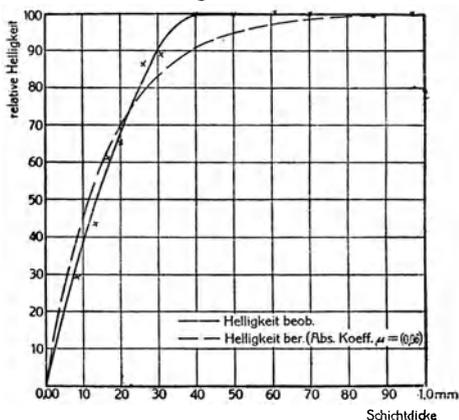
Abhängigkeit der Helligkeit von der Schichtdicke bei 0,05 g Leuchtfarbe/0,1 mm Dicke.

Schichtdicke		Helligkeit		
beobachtet	korrigiert	beobachtet	ausgeglichen	Differenz
0,05	0,05	33,6	30,7	— 2,9
10	09	51,5	53,5	+ 2,0
15	14	70,8	71,4	+ 0,6
20	19	87,7	87,0	— 0,7
25	23	94,5	94,7	+ 0,2
30	28	100,9	99,4	— 1,5
98*)	97	100,3	100,0	

*) Bei 0,03 g Leuchtfarbe/0,1 m Dicke.

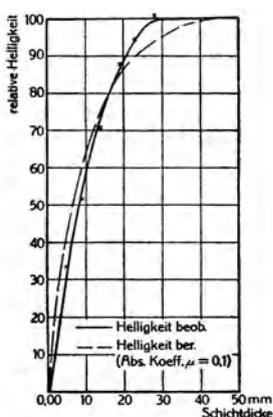
gesprochen (s. Tabelle 15 und Fig. 16, ausgezogene Kurve); dabei haben hier schon Schichten von 0,3 mm ab als unendlich dick zu gelten, während ein Optimum gleichfalls nicht zu bemerken ist (streng genommen hätte man die Schichtdicken noch um 0,02 mm verkleinern müssen; wegen der Unsicherheit dieser Korrektur ist aber davon Abstand genommen). Bei diesen Messungen waren die einzelnen Küvetten an die 0,98 mm-Küvette der ersten Meßreihe angeschlossen und ergaben bei unendlich dicker Schicht denselben Wert wie diese. In Tabelle 16 ist dann ein Vergleich zwischen

Fig. 15.



Abhängigkeit der Helligkeit von der Schichtdicke bei 0,03 g Leuchtfarbe/0,1 mm Dicke.

Fig. 16.



Abhängigkeit der Helligkeit von der Schichtdicke bei 0,05 g Leuchtfarbe/0,1 mm Dicke.

beiden in der Weise durchgeführt, daß man die Werte der Schichtdicke berechnete, welche sich bei einer solchen Zusammenpressung der Leuchtfarbe in den ersten Küvetten ergeben hätten, daß die Menge 0,05 g Leuchtfarbe/0,1 mm betragen würde (2. Spalte). Es sind dann die für die Helligkeiten aus den beiden Kurven (Fig. 15 und 16) sich ergebenden Werte einander gegenübergestellt und wie man sieht, stimmen die Ergebnisse, von zwei Ausnahmen in der Übergangszone abgesehen, recht gut miteinander überein. Es kommt also nur auf die Menge der Leuchtfarbe und somit die Anzahl leuchtender Teilchen in dem betreffenden Volumen an. Danach müßte sich die Schichtdicke, von welcher ab die Helligkeit der Leuchtfarbe mit 0,05 mg Leuchtfarbe/0,1 mm als unendlich dick zu betrachten wäre, zu $0,50 \cdot \frac{3}{5} = 0,30$ mm ergeben, was in Übereinstimmung mit der Beobachtung steht.

Tabelle 16.

Vergleich zwischen den Versuchen mit 0,03 und 0,05 g
Leuchtfarbe/0,1 mm Dicke.

Schichtdicke bei		Helligkeit bei		
0,03 g	0,05 g	0,03 g	0,05 g	Differenz
0,05	0,03	17,0	17,8	— 0,8
10	06	34,0	36,5	— 2,5
15	09	51,0	53,5	— 2,5
20	12	68,0	65,0	+ 3,0
25	15	85,0	75,0	+10,0
30	18	93,0	84,5	+ 8,5
35	21	97,0	91,5	+ 5,5
40	24	98,9	96,1	+ 2,8
45	27	99,6	98,8	+ 0,8
50	30	99,9	100,0	+ 0,1

Es wurde nun versucht, ob sich die Abhängigkeit der Helligkeit von der Schichtdicke als einfacher Absorptionsvorgang deuten ließ. Dabei wurde für die Absorption des Lichtes in der strahlenden Platte die (sicherlich nicht genau zutreffende) Formel

$$H = H_{\infty} \cdot (1 - e^{-\mu t})$$

angesetzt*), worin μ der Absorptionskoeffizient des Lichtes ist. Die beste Übereinstimmung ergab sich bei der ersten Versuchsreihe für $\mu = 0,06$ (bezogen auf eine Dicke von $1/100$ mm), woraus sich für die zweite Versuchsreihe $\mu = 0,1$ berechnet. Wie aus Tabelle 17 und Fig. 15 und 16 (gestrichelte Kurven) folgt, treten in beiden Fällen systematische Abweichungen, namentlich in der Übergangszone von dem linearen Verlauf zur unendlich dicken Schicht, auf. Eine photometrische Bestimmung des Absorptionskoeffizienten des Lichtes ($550 \mu\mu$) beim Zinksulfid (0,03 g/0,1 mm Dicke) ergab den damit recht gut übereinstimmenden Wert $\mu = 0,05$.

Man ersieht, am besten aus Tabelle 18, daß es bei 0,03 g Leuchtfarbe/0,1 mm am vorteilhaftesten ist, bis zu 0,25 mm Dicke zu gehen, da bis hierhin die Helligkeit proportional dazu wächst und dann bereits 85 Proz. des maximalen Wertes bei unendlich dicker Schicht erreicht, während man bei 0,30 mm 93 Proz. erhalten würde. Bei der anderen Leuchtfarbe mit 0,05 g/0,1 mm müßte man für 90 Proz.

*) S. Meyer und v. Schweidler, Radioaktivität, S. 75.

Tabelle 17.

Vergleich zwischen Beobachtung und Rechnung für

$\mu = 0,06$ bei 0,03 g Leuchtfarbe/0,01 mm

$\mu = 0,1$ „ 0,05 g „ /0,01 mm.

Schicht- dicke	0,03 g			0,05 g		
	beob.	berechnet	Differenz	beob.	berechnet	Differenz
0,00	0,0	0,0		0,0	0,0	
05	17,0	25,9	— 8,9	30,7	39,9	— 9,2
10	34,0	45,1	— 11,1	57,3	63,2	— 5,9
15	51,0	59,3	— 8,3	75,0	77,7	— 2,7
20	68,0	69,9	— 1,9	89,5	86,5	+ 3,0
25	85,0	77,7	+ 7,3	97,0	91,8	+ 5,2
30	93,0	83,5	+ 9,5	100,0	95,0	+ 5,0
35	97,0	87,4	+ 9,1			
40	98,9	90,8	+ 8,1			
45	99,6	93,0	+ 6,6			
50	99,9	95,0	+ 4,9			
60	100,0	97,2	+ 2,8			
70	100,0	98,5	+ 1,5			
80	100,0	99,3	+ 0,7			
90	100,0	99,5	+ 0,5			
1,00	100,0	99,8	+ 0,2			

Tabelle 18.

Beiträge der einzelnen Schichten
in Prozenten der maximalen Helligkeit.

Schicht	0,03 g	0,05 g
	Proz.	Proz.
0— 5	17,0	30,7
5—10	17,0	26,6
10—15	17,0	17,7
15—20	17,0	14,5
20—25	17,0	7,5
25—30	8,0	3,0
30—35	4,0	
35—40	1,9	
40—45	0,7	
45—50	0,3	

der maximalen Helligkeit auf 0,2 mm gehen; diese ist auch, soweit nichts anderes vermerkt, bei unseren übrigen Versuchen verwendet worden.

Die zweckmäßigste Schichtdicke wird noch von der Art der Sidotblende abhängen; so wird ein gut lumineszierendes, aber stark absorbierendes Zinksulfid bei gleichem Ra-Gehalt in dicker Schicht dunkler, in dünner dagegen heller erscheinen als ein weniger gut leuchtendes mit schwächerer Absorption. Das erstere wäre insofern vorzuziehen, als man bei kleinen Schichtdicken einen geringeren Radiumzusatz zur Erzielung gleicher Helligkeit braucht und damit eine größere Lebensdauer erhält (s. Abschnitt 6).

Die Helligkeit wird ferner im allgemeinen mit abnehmender Korngröße der Leuchtfarbe zunächst wachsen, da die Ausnutzung der α -Strahlen wegen der wesentlich größeren Oberfläche dann eine bessere wird. Dem ist jedoch dadurch eine Grenze gezogen, daß die Erregung der Radiolumineszenz keine reine Oberflächenwirkung ist, und daß die Lichtdurchlässigkeit beim Unterschreiten einer gewissen Korngröße immer geringer wird (wegen der Reflexionen an den vielen kleinen Grenzflächen). Dadurch kommt es, daß Leuchtfarben aus grobkristallisiertem Zinksulfid in dicker Schicht erheblich heller erscheinen als sehr feinkörnige, während bei bestimmter Schichtdicke beide die gleiche Helligkeit aufweisen¹⁾.

2. Einfluß des Radiumgehaltes.

Auch die Prüfung der Abhängigkeit von der Größe der radioaktiven Beimengung ist zuerst von Bahr¹⁾ untersucht worden. Seine Ergebnisse sind in Tabelle 19 mitgeteilt, in welcher auch der Ra-Gehalt einer gleich hellen Ra-Leuchtfarbe berechnet ist (da die Rd Th-Mengen auf Radiumbromid bezogen sind, erhält man das dem Ra-Metall entsprechende γ -Äquivalent durch Multiplikation mit 0,536, und da ferner 1 g Rd Th in bezug auf die Helligkeit 1,5 g Ra äquivalent ist, muß man die Zahlen mit $0,536 \cdot 1,5 = 0,70$ multiplizieren, um den Ra-Gehalt einer gleich hellen Ra-Leuchtfarbe zu erhalten). Hier ergibt sich mit wachsendem Gehalt an radioaktiver Beimengung eine relative Abnahme der Helligkeit, doch dürfte diese auf die bei der starken α -Strahlung schon während des Erreichens des radioaktiven Gleichgewichtes bereits erfolgte Zerstörung des Zinksulfides (s. Abschnitt 6) zurückzuführen sein.

Nach unseren Messungen [s. Tabelle 20 (obere 8 Zeilen) und Fig. 17, ausgezogene Kurve] ist die Helligkeit sehr angenähert

proportional dem Ra-Gehalt; die auftretenden kleinen Abweichungen sind wohl auf Versuchsfehler zurückzuführen. Der Verlauf der Kurve deutet allerdings darauf hin, daß bei starkem Ra-Gehalt die Helligkeit in geringerem Maße wachsen würde; dies wäre dann

Tabelle 19.

Abhängigkeit der Helligkeit vom Ra-Gehalt nach den Beobachtungen von Bahr.

mg Rd Th/g Zinksulfid (bez. auf Ra Br ₂ + 2 H ₂ O)	mg Ra/g Zinksulfid (bez. auf Ra met.)	Helligkeit	Helligkeit/Rd Th
0,23	0,16	0,23	1,87
0,47	33	43	70
0,7	49	58	54
1,0	70	77	43

Tabelle 20.

Abhängigkeit der Helligkeit vom Ra-Gehalt.

Ra-Gehalt			Relative Helligkeit			Flächenhelle in HK/cm ² · 10 ⁶
ber.	beob.	Differenz Proz.	beob.	ausgegl.	Differenz	
0,0212	0,0195	+ 8,7	5,25	5,23	+ 0,02	2,43
0254	0247	+ 2,8	6,85	6,26	+ 0,52	3,16
0360	0352	+ 2,3	9,88	8,86	+ 1,02	4,56
0549	0538	+ 2,0	14,40	13,54	+ 0,86	6,65
0718	0668	+ 7,5	18,12	17,64	+ 0,98	8,37
1058	0978	+ 8,2	25,00	25,90	- 0,90	11,60
	(1051)	(+ 0,7)				
2116	2063	+ 2,6	50,00	51,75	- 1,75	23,20
1058*)	1044	+ 1,3	17,60			8,24
0212**)	0212	± 0,0	4,03	3,70	+ 0,33	1,86
0265	0266	+ 0,4	5,09	4,70	+ 0,39	2,35
0353	0344	+ 2,6	5,94	6,28	- 0,34	2,72
0529	0523	+ 1,1	9,17	9,40	- 0,23	4,24

*) Anderes Zinksulfid.

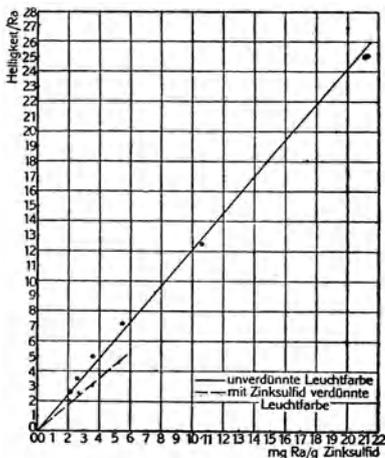
***) Mischung von 0,1058 Leuchtfarbe und Zinksulfid.

möglich, wenn mehrere α -Teilchen dasselbe komplexe Zentrum treffen würden. Für die üblichen schwachen Leuchtfarben kann man aber mit genügender Genauigkeit die Helligkeit dem Ra-Gehalt proportional setzen; dies wird außerdem um so näher zu treffen, je feinkörniger das Zinksulfid, da dann seine Oberfläche besser entwickelt ist¹⁾. Dieses Ergebnis steht in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen von Gley³⁾ und neueren Angaben von Bahr²⁾, welche gleichfalls angenäherte Proportionalität zwischen diesen beiden Größen

finden. In der Tabelle sind auch noch die nach der Ausgangsmenge berechneten und die mit dem Bothe-Apparat bestimmten Ra-Gehalte angegeben; von wenigen Ausnahmen abgesehen, stimmen beide etwa auf 2 Proz. überein. Es wurde ferner eine Leuchtfarbe aus einem schlechter lumineszierenden Zinksulfid (9. Reihe) gemessen, die eine 1,42fach geringere Helligkeit aufwies. Man sieht also, daß man mit einem guten Zinksulfid, gegenüber einem (nicht einmal besonders) schlechten etwa 40 Proz. mehr an Helligkeit erzielen kann. Durch systematische Arbeit zur Gewinnung einer besser radiolumineszierenden Sidotblende würden sich demnach noch beträchtliche Fortschritte bei den Leuchtfarben erreichen lassen.

Weiterhin wurden durch Vermischen der Leuchtfarbe mit 0,1058 mg Ra mit Zinksulfid eine Reihe schwächerer Leuchtfarben hergestellt (letzte 4 Zeilen der Tabelle 20, gestrichelte Kurve in Fig. 17), bei denen sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der theoretischen und der beobachteten γ -Strahlung zeigt [mit Hilfe der hier gefundenen Werte ist dann der Ra-Gehalt für die 0,1058 mg Leuchtfarbe (7. Zeile, eingeklammerte Werte) berechnet]. Auch bei diesen ist die Helligkeit proportional dem Ra-Gehalt, bei gleicher Menge/g Zinksulfid aber 0,74 (also $\frac{3}{4}$) mal kleiner als bei der unter feuchtem Zusatz der benötigten Ra-Menge hergestellten Leuchtfarbe. Es wird sich deshalb dieses Verfahren zur Fabrikation

Fig. 17.



Abhängigkeit der Helligkeit vom Ra-Gehalt.

schwächerer Leuchtfarben empfehlen, und nicht die Verdünnung einer stärkeren mit Zinksulfid, wie es von manchen Seiten vorgeschlagen wird.

In Tabelle 20 und 21 sind dann noch die Flächenhellen in HK/cm² angeführt. Diese wurden mit einer Küvette bestimmt (s. Abschnitt 3), welche denselben Photostrom wie die Leuchtfarbe mit 0,2166 mg Leuchtfarbe ergab.

Tabelle 21.
Flächenhelle in HK/cm² · 10⁻⁶ bei
bestimmtem Ra-Gehalt.

mg Ra/g Zinksulfid	HK/cm ² · 10 ⁶	Mischung aus 0,1 Leuchtfarbe
0,2	22,0	
0,1	11,0	
0,05	5,5	4,08
0,025	2,75	2,04
0,01	1,1	0,82
0,005	0,55	0,41
0,002	0,22	0,16

3. Absolute Photometrie der Leuchtfarben.

Eine absolute Bestimmung der Flächenhelle von Leuchtfarben hat zuerst Walter⁶⁾ an Leuchtuhren ausgeführt. Er fand für zwei Uhren (die er mit *C* und *B* bezeichnet) die folgenden Flächenhellen:

$$C = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ HK/cm}^2$$

$$B = 0,57 \cdot 10^{-6} \text{ HK/cm}^2$$

(die Einzelwerte schwanken um maximal etwa 20 Proz.).

Auch die Zahlen von Bahr¹⁾, die sich auf 0,25 mm Schichtdicke beziehen, kann man auf absolute Werte umrechnen. Da bei ihm die Helligkeit mit abnehmendem Rd Th-Gehalt relativ anwächst, so kann man sie für 0,1 mg Ra zu etwa 0,15 Lux oder $3,33 \cdot 10^{-6} \text{ HK/cm}^2$ ansetzen. Ebenso kann man auch aus den Beobachtungen von Dorsey²⁾ einen absoluten Wert entnehmen; er fand in einem von ihm angegebenen Beispiel gleiche Helligkeit der Leuchtfarbe bei Beleuchtung seiner Mattscheibe mit 1,38 HK auf 70,5 cm Entfernung. Danach ist die Beleuchtungsstärke (s.

3. Kapitel) $\frac{0,0396 \cdot 1,38}{0,7052} = 0,11 \text{ MK}$ und somit die Flächenhelle

$e = 2,4 \cdot 10^{-6}$ HK/cm²; eine Angabe über die Aktivität und Schichtdicke findet sich bei ihm nicht. Nach einer anonymen Mitteilung⁷⁾ wird in England bei einer Leuchtfarbe mit 0,4 mg Radiumbromid, entsprechend 0,215 mg Ra-Element, eine Helligkeit von mindestens 0,36 Lux entsprechend $8 \cdot 10^{-6}$ HK/cm², also für 0,1 mg Ra-Element $4 \cdot 10^{-6}$ HK/cm² verlangt; auch hier fehlt die Angabe der Schichtdicke. Die Größenordnung der drei Werte stimmt eigentlich besser miteinander überein, als man nach den zum Teil sicher sehr verschiedenen Verhältnissen hätte erwarten dürfen.

Metzner⁴⁾ ermittelte die Beleuchtungsstärke einer sehr schwachen Leuchtfarbe zu $\frac{1}{120}$ Lux, entsprechend $0,19 \cdot 10^{-6}$ HK/cm², die sich durch Auflegen von Papierschirmen auf $\frac{1}{200}$ des Wertes, also auf rund $1 \cdot 10^{-9}$ HK/cm², abschwächen ließ.

Eigene Messungen haben wir in der Weise angestellt, daß die dem Lummer-Brodhun-Photometer auf 4,95 cm genäherte ganz gefüllte Küvette mit einer im Abstände von 503,0 cm stehenden Glühlampe durch drei Beobachter verglichen wurde, wobei man die Stromstärke der Glühlampe so lange änderte, bis beide Gesichtsfeldhälften gleich hell erschienen. Es wurde dann die Glühlampe für verschiedene Stromstärken mit der Hefnerlampe geeicht und so ihre Helligkeit bei der Photometrierung der Leuchtfarbe bestimmt. Die Helligkeit ergibt sich im Mittel (für einen Ra-Gehalt von 0,2166 mg) zu $19,51 \cdot 10^{-6}$ HK/1,012 cm² (bei einer größten Abweichung von 4 Proz. zwischen den Einzelmitteln). Zu dieser sind noch 7,8 Proz. wegen der Verluste bei der zweimaligen Reflexion an der abschließenden Glasplatte, sowie 10 Proz. wegen der Abnahme der Leuchtkraft hinzuzufügen, welche durch die in der Zeit von 26 Tagen zwischen Erreichung der Reife der Leuchtfarbe und der Messung erfolgten Zerstörung des Zinksulfids und des dadurch bedingten Rückganges der Helligkeit verursacht sind. Sie ergibt sich dann zu $23,2 \cdot 10^{-6}$ HK/cm² und somit für 0,1 mg Ra/g Zinksulfid zu $10,7 \cdot 10^{-6}$ HK/cm².

Eine frühere Bestimmung mit einer anderen Leuchtfarbe von 0,1791 mg Ra hatte nach Umrechnung auf 0,1 mg Ra/g Zinksulfid den nur unwesentlich davon abweichenden Wert $12,2 \cdot 10^{-6}$ HK/cm² ergeben. Beachtet man noch, daß bei dieser die Zerstörung etwas langsamer erfolgt als bei einer Leuchtfarbe von 0,2 mg, und daß damit der berechnete Wert etwas zu hoch ausfallen mußte, so wird die Übereinstimmung zwischen den beiden Zahlen noch besser; im Mittel kann man also mit $11 \cdot 10^{-6}$ HK/cm² rechnen. Der Größenordnung nach stimmt unser Wert mit dem von Bahr erhaltenen

überein und mehr ist auch bei der Verschiedenheit von Zinksulfid, Schichtdicke und Zusammenpressung nicht zu erwarten, zumal auch noch bei der Umrechnung von der Beleuchtungsstärke auf die Flächenhelle verschiedene Fehler eingehen. Man kann demnach angeben, daß eine aus gutem Zinksulfid mit 0,1 mg Ra/g Sidotblende hergestellte Leuchtfarbe bei 0,20 mm Schichtdicke, ziemlich kräftig zusammengepreßt (einen Monat nach der Herstellung), eine Flächenhelle von $1 \cdot 10^{-5}$ HK/cm² aufweist.

4. Die Helligkeit von Leuchtschirmen.

Vielfach finden die Leuchtfarben nicht als lockeres, in durchsichtigen, gasdicht verschlossenen Hüllen eingebettetes Pulver, sondern als Leuchtschirm Verwendung, bei welchem dieses mit irgend einem Bindemittel auf einer Unterlage aufgetragen wird (s. 6. Kapitel). Diese Schirme haben nun nach englischen Messungen⁷⁾ eine viermal, nach Angaben von Bahr¹⁾ eine bis 75 Proz. geringere Helligkeit als Leuchtpulver; leider sind aber die näheren Bedingungen, unter welchen diese Zahlen erhalten wurden, nicht angegeben. Streng vergleichbare Werte erhält man nur, wenn man gleich dicke Schichten, welche die gleiche Menge von Leuchtfarbe enthalten, in beiden Fällen vergleicht. Eigene Messungen ergaben für Leuchtfarbe eine zweimal größere Helligkeit als ein Schirm unter denselben Bedingungen. Eine andere Messung mit verschiedenen Querschnitten von Pulver und Schirm ergab nach Umrechnung auf gleiche leuchtende Fläche dieses Verhältnis zu 2,4, so daß man im Mittel mit 2,2 rechnen kann. Diese geringere Helligkeit wird dadurch verursacht, daß durch das Bindemittel ein Teil der α -Strahlen absorbiert bzw. ihre Reichweite und damit auch die Ionisierung im Zinksulfid, von welcher die Intensität des Lichtes abhängt, verringert wird.

5. Einfluß der Vorbelichtung

Da das Zinksulfid photoluminesziert, so kann man durch Bestrahlung mit Licht die Helligkeit einer radioaktiven Leuchtfarbe vorübergehend wesentlich, bei schwachen Farben bis auf das 100fache⁵⁾, steigern, wozu schon eine Einwirkung von Tageslicht für wenige Sekunden genügt. Diese Photolumineszenz geht natürlich entsprechend dem Abfall des Dauerprozesses wieder zurück, immerhin liegt aber hierin eine Gefahr zu einer gewollten oder ungewollten Täuschung. Hat etwa eine Leuchtuhr im Schaufenster

gelegen, so wird sie in wundervoll hellem Lichte erstrahlen, nach wenigen Stunden indessen wird der Käufer merken, daß die Helligkeit auf einen verschwindend kleinen Betrag gesunken ist. Man sollte deshalb alle mit Leuchtfarbe versehenen Instrumente erst nach mehrstündiger Aufbewahrung im Dunkeln prüfen und kaufen. Da dieses praktisch aber nicht durchzuführen sein wird, so sollte man bei jedem Kauf verlangen, daß der betreffende Gegenstand für etwa $\frac{1}{2}$ Minute mit rotem Licht, z. B. einer photographischen Dunkelkammerlampe, im verdunkelten Raume bestrahlt wird, da hierdurch ja die Photolumineszenz ausgelöscht wird.

Belichtete Leuchtpulver kann man übrigens daran erkennen, daß beim Schütteln dunkle Stellen auftreten, da dann aus dem Innern stammende nicht photo-, sondern nur radiolumineszierende Teile an die Oberfläche kommen, während eine rein radiolumineszierende Leuchtfarbe auch nach dem Schütteln gleichmäßig leuchtet. Ferner unterscheidet sich die Photo- von der Radiolumineszenz dadurch, daß jene unter der Lupe ganz gleichmäßig erscheint, während man bei dieser das durch die Szintillationen verursachte eigentümliche Flimmern und Wogen beobachtet.

Tabelle 22.

Einfluß der Belichtung auf die Helligkeit nach Beobachtungen von Metzner.

Belichtung	mK. Sek.	Beleuchtungsstärke in Lux	Flächenhelle in HK/cm ²	Steigerung	Abfallzeit in Stunden
1 ^h Mittagssonne (VIII)	—	> 1,6	> 35,6 · 10 ⁻⁶	> 187	6
1 ^h heller Arbeitsplatz (3 bis 4 p. m) . . .	—	1,6	35,6 „	187	3
15 ^{sek} 2 m vom Fenster (morgens)	—	0,83	18,5 „	97,5	1
1 ^m 2 m vom Fenster .	—	0,83	18,5 „	97,5	1
1 ^h 2 m vom 50 NK	45 000 7 500 24 000	0,085	1,3 „	6,8	$\frac{1}{2}$
10 ^m 2 m „ 50 „		0,033	0,74 „	3,9	$\frac{1}{3}$
2 ^m $\frac{1}{2}$ m „ 50 „		0,085	1,3 „	6,8	$\frac{1}{2}$

Die ersten Versuche über den Einfluß künstlicher Belichtung hat Walter⁶⁾ angestellt, indem er die eine Hälfte einer Leuchtuhr abdeckte und die andere mit einer Glühlampe von 25 HK in bestimmtem Abstände so lange bestrahlte, bis ein eben merklicher

Helligkeitsunterschied zwischen den beiden Hälften auftrat. Während bei Sidotblende hierzu eine Beleuchtung von 1 MK für 5 Sek., also 5 MK . sek, genügten, betrug die Werte bei den beiden vorher erwähnten Uhren *B* und *C* 1500 bzw. 7500 MK . sek. Bei einem Abstände der Lampe von 1 m würde also eine Belichtungszeit von $1500/25 = 60$ sek erforderlich sein, um eine Steigerung der Helligkeit hervorzurufen. Aus seinen Angaben folgt auch, daß der Einfluß der Belichtung um so kleiner wird, je stärker die Radiolumineszenz ist.

Metzner⁴⁾ erhielt die in Tabelle 22 wiedergegebenen Werte, die sich auf eine sehr schwache Leuchtfarbe ($0,19 \cdot 10^{-6}$ HK/cm²) beziehen. Dabei sind die Steigerungen der Helligkeit und die Zeiten angegeben, in welchem sie wieder auf den allein von der Radiolumineszenz herrührenden Wert gesunken waren; eine Dauerbeschädigung war hierbei nicht zu bemerken.

6. Der Abfall der Helligkeit.

So wie das Zinksulfid bei langdauernder oder intensiver Lichtbestrahlung (namentlich durch die blauen, violetten und noch mehr durch die ultraviolett Strahlen), ferner durch atmosphärische Einflüsse in seiner Photolumineszenz stark geschwächt wird (womit gleichzeitig eine Verfärbung parallel geht), so tritt auch bei der Radiolumineszenz ein mehr oder minder schnelles Nachlassen der Helligkeit ein. Schon im Jahre 1910 hatte Marsden⁶⁾ Versuche über dieses Abklingen angestellt und gefunden, daß es bei starker α -Strahlung außerordentlich schnell erfolgt. Die Abnahme betrug bei der Einwirkung von 60 Millicurie Ra Em auf 8,2 cm² Zinksulfid in acht Stunden, in welcher sie selbst nur 6 Proz. an Aktivität verloren hatte, 50 Proz. und war selbst bei 0,19 Millicurie deutlich zu bemerken. Diese Arbeit ist aber anscheinend jahrelang unbeachtet geblieben, denn noch 1915/16 finden sich Angaben, die von nahezu unbegrenzter Leuchtdauer sprechen. Demgegenüber wird dann aber von anderer Seite auf das Nachlassen der Leuchtkraft hingewiesen^{1) 2) 3) 4) 8) 9) 11) 12) 13)}, die vereinzelt auf eine Zerstörung des Zinksulfids durch das Bombardement der α -Teilchen^{1) 4) 11) 12)}, zum Teil aber auch auf einen Einfluß der Atmosphärien und chemische Einwirkung des Bindemittels⁸⁾ (bei Schirmen) zurückgeführt wird; zum Beweise dafür wird darauf hingewiesen, daß eine Leuchtemaille (s. 6. Kapitel) in drei Jahren viel weniger an Leuchtkraft verloren hatte als ein Leuchtschirm.

Die verschiedenen sachgemäßen Angaben stimmen darin überein, daß bei hellen Leuchtfarben in drei bis vier Jahren ein deutlicher Rückgang bemerkbar und daß die Abnahme der Helligkeit um so kleiner ist, je geringere Mengen an radioaktiver Substanz zugesetzt sind, d. h. also, je schwächer die Helligkeit der Leuchtfarbe von vornherein war. Andererseits ist bei starken Leuchtfarben ein Verlust von 50 Proz. in einem Jahre nicht außergewöhnlich¹⁾, während bei 75 mg Radiumbromid, entsprechend 40 mg Ra, dieser schon in 24 Stunden erfolgt³⁾. In England wurde deshalb allen Leuchtfarben, die länger als ein Jahr lagern müssen, keine größere Menge als 0,2 mg Radiumbromid, also etwa 0,1 mg Ra-Element, zugesetzt¹³⁾; man hatte dort auch gefunden, daß sich schließlich alle anfänglich verschieden hellen Leuchtfarben einem konstanten Endwerte nähern. Es gibt demnach überhaupt keine Leuchtfarbe mit gleichbleibender Helligkeit; das schließt natürlich nicht aus, sehr schwache Leuchtfarben, wie es jetzt vielfach geschieht, als konstante Lichtquellen zu Adaptometern (siehe 6. Kapitel) zu benutzen, da bei diesen der Rückgang so langsam erfolgt, daß er bei der geringen Genauigkeit der Photometrierung für diese außerordentlich kleinen Lichtstärken im Verlauf mehrerer Monate nicht zu bemerken ist.

Trotzdem diese Angaben auch an so vielen von Lieferantenkreisen gelesenen Stellen veröffentlicht sind, wird hier doch noch teilweise eine marktschreierische, den Tatsachen widersprechende Reklame getrieben. Mündliche und durch Zeitungsannoncen angegebene Garantien von 10 bis 20 Jahren gehören nicht zu den Seltenheiten. Angebote aber von unbegrenzter Leuchtdauer, wie man sie auch heute noch vielfach lesen kann, sollten nun wirklich verschwinden, und wenn gar Leuchtfarben von ständig wachsender Leuchtkraft angepriesen werden, so kann man das nur als unlauteren Wettbewerb bezeichnen. Dabei soll noch ganz davon abgesehen werden, daß heute Ms Th-Leuchtfarben als Ra-Leuchtfarben angegeben werden, wie dem Fachmann ohne weiteres daraus klar wird, daß ihnen die Eigenschaft zugeschrieben wird, in den ersten Jahren noch an Helligkeit zuzunehmen. Ebenso wenig gerechtfertigt ist auch die Behauptung, daß gut leuchtende Farben eine Dauer von sieben Jahren, extra starke dagegen eine Dauer von 15 Jahren haben, da gerade diese viel stärker nachlassen; sympathisch mutet dagegen ein Prospekt an, in welchem darauf hingewiesen wird, daß hellere Leuchtfarben eine geringere Lebensdauer haben. Da der Kauf von Leuchtfarben aus so vielen Gründen

reine Vertrauenssache ist, sollte sich der reelle Fabrikant und Geschäftsmann vor derartigen objektiv unwahren Behauptungen wie den erwähnten hüten.

Wirkliche Messungen über das Nachlassen der Helligkeit sind zuerst von Marsden⁶⁾ ausgeführt; er stellte zunächst fest, daß durch das Bombardement der α -Teilchen die Anzahl der Szintillationen nicht geändert, sondern nur ihre Helligkeit verringert wird.

Tabelle 23.

Abnahme der Helligkeit einer Em-Leuchtfarbe nach Beobachtungen von Marsden.

$\alpha/cm^2 \cdot sec$		$9 \cdot 10^8$		$2 \cdot 10^8$		$4 \cdot 10^7$		$2,5 \cdot 10^5$	
Zeit in Stunden	Em $e^{-\lambda t}$	Em	const	Em	const	Em	const	Em	const
0	100,0	100	100,0	100	100,0	100	100,0	100	100,0
5	96,3	63	40,0	78	80,6	90	95,2	92,5	98,5
10	92,8	43	24,5	63	65,8	82	91,0	86	97,3
20	86,1	23	13,5	44	46,2	69	84,0	78	95,6
30	79,9	14,2	6,2	31,5	34,7	59	77,6	71	94,2
40	74,1	9,4	—	23,0	27,3	51	71,7	64	93,3
50	68,7	6,8	—	18,5	22,0	45	66,7	58	92,6
60	63,8	5,2	—	15,0	17,9	39,5	61,6	53	92,0
80	54,9	3,95	—	10,0	13,7	31	53,3	44	91,5
100	47,2	2,25	—	6,0	11,2	25,5	46,0	37	91,0
120	40,7	1,68	—	4,5	9,4	22,0	41,0	31	90,5
140	35,0	1,30	—	3,5	—	—	—	—	—
160	30,1	1,05	—	2,85	—	—	—	—	—
200	22,2	—	—	1,9	—	—	—	—	—

Seine eigentlichen Versuche wurden so angestellt, daß ein Glasrohr, welches auf seiner Innenseite rings mit Zinksulfid mit einer Oberfläche von $8,2 \text{ cm}^2$ ausgekleidet war, mit Ra Em gefüllt wurde. Unter diesen Umständen senden 72 Millicurie Em auf jedes Quadratcentimeter des Zinksulfidschirmes

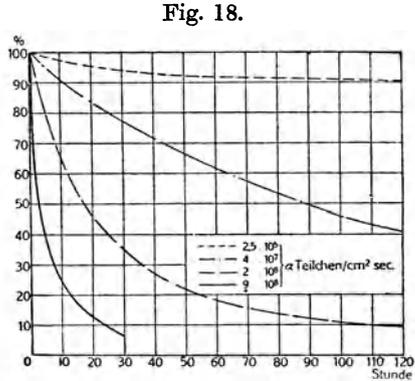
$$\frac{0,072 \cdot 3 \cdot 3,4 \cdot 10^{10}}{8,2} = 9 \cdot 10^8 \alpha\text{-Teilchen/cm}^2 \cdot \text{sec.}$$

Danach ergeben sich für die übrigen von ihm untersuchten Fälle die folgenden Zusammenhänge:

$9 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^6$	$\alpha\text{-Teilchen/cm}^2 \cdot \text{sec}$
72	16	3,2	0,20	Millicurie Em

Für diese Werte ermittelte er die in Tabelle 23 dargestellte Abnahme der Helligkeit, wobei der Anfangswert in allen Fällen gleich 100 gesetzt ist. Dabei ist in den linken Hälften der einzelnen Spalten (Überschrift Em) der Abfall angegeben, wie er wirklich beobachtet wurde.

Diese Zahlen sind nun nicht ohne weiteres zu benutzen, es sind deshalb seine Werte umgerechnet worden auf den Fall, daß die α -Strahlung während der ganzen Zeit konstant geblieben wäre (rechte Teile der Spalten mit der Überschrift const; über die Art der Umrechnung s. unten). Das Abklingen im letzteren Falle ist in Fig. 18 dargestellt; man ersieht aus dieser, daß es nicht exponentiell vor sich geht, sondern zu Anfang wesentlich rascher als zum Schluß erfolgt. So sinkt die Helligkeit bei einem Bombardement von $9 \cdot 10^8 \alpha$ -Teilchen/cm². sec zu Anfang um 20 Proz. in $1\frac{1}{4}$ Stunden, von 40 Proz. auf 20 Proz. dagegen erst in etwa 8 Stunden, und ähnlich liegen die Verhältnisse auch in den übrigen Fällen.



Abnahme der Helligkeit einer Ra-Leuchtfarbe nach Beobachtung von Marsden.

In derselben Weise hat Marsden übrigens auch den Willemit untersucht und gefunden, daß bei gleicher α -Strahlung das Abklingen wesentlich langsamer als bei der Sidotblende geschieht; so brachten bei jenem erst 10,4 Millicurie Em denselben Abfall hervor, wie 4,8 Millicurie beim Zinksulfid. Die außerordentlich starke Zerstörung des Bariumplatinocyanürs durch α -Strahlen ist bereits früher behandelt worden (s. 2. Kapitel, d). Bei β -Strahlung ist die Ermüdung übrigens bedeutend geringer als durch das α -Bombardement, und zwar erfolgt sie auch hier beim Bariumplatinocyanür in wesentlich stärkerem Grade als beim Zinksulfid und -silicat, bei welchem beiden sie etwa von gleicher Größenordnung ist.

Auf Grund der Versuche von Marsden hat dann Rutherford⁷⁾ eine Theorie entwickelt, welche diese Beobachtungen recht gut darstellt. Er nimmt, ebenso wie Lenard, für die Photo-lumineszenz eine Reihe von aktiven Zentren an, die in verhältnismäßig geringer Zahl, etwa 1 auf 1000 bis 10000 gewöhnlicher Moleküle im Zinksulfid verteilt und allein erregbar sind. Die

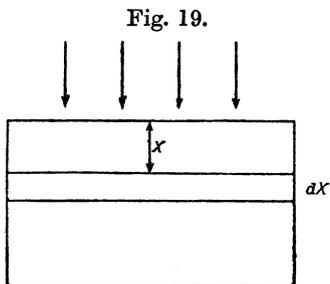
Szintillationen sollen nun nicht von der Dissoziation eines einzelnen, sondern einer ganzen Anzahl aktiver Zentren herrühren, welche auf dem Wege des α -Teilchens liegen. Dabei wird nun aber jedes dissoziierte komplexe Zentrum zerstört und kann nicht von neuem erregt werden. Bei der immerhin recht großen Zahl der Zentren wird indessen, zunächst wenigstens, die Zahl der Szintillationen nicht abnehmen, sondern nur ihre Intensität.

Da das Leuchten also durch eine Ionisierung hervorgerufen wird, die völlig mit der der Luftmoleküle zu vergleichen ist — Rutherford nimmt auch an, daß ein α -Teilchen im Zinksulfid genau soviel Ionen erzeugt wie in Luft —, so galt es zunächst festzustellen, wie sie mit der Reichweite R abnimmt. Bezeichnet man die durchlaufene Strecke mit D , so ergeben sich auf Grund einer von Bragg aufgestellten Beobachtungsreihe die folgenden Ionisierungen i/i_0 für verschiedene Werte von D/R (dabei bedeutet i_0 den Anfangswert der Ionisierung):

D/R	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
i/i_0	1,00	0,80	0,65	0,45	0,295	0,18	0,10	0,056	0,027	0,012	0,005	0,0
e^{-KD}	1,00	0,80	0,64	0,41	0,26	0,165	0,105	0,067	0,042	0,027	0,017	0,011

Die gefundenen Werte von i/i_0 lassen sich nun, wie aus der letzten Zeile hervorgeht, allerdings nur in erster Annäherung, durch eine Exponentialfunktion der Form e^{-KD} darstellen, wenn man

$K = 4,5/R$ setzt. Man betrachte nun eine Schicht von 1 cm^2 Fläche, auf welche ein Parallelstrahlenbündel von α -Strahlen auffällt (Fig. 19). Werden von der Em und jedem ihrer Zerfallsprodukte, RaA und RaC , P α -Teilchen/sec ausgesandt, und erzeugen sie (zusammen) q Ionen, so werden in der Schicht dx , die sich im Abstände x befindet, $K \cdot P \cdot q \cdot e^{-Kx} \cdot dx$ Ionen erzeugt. Bezeichnet man ferner die Zahl der Zinksulfidmoleküle im



Auffall paralleler α -Strahlen auf eine Fläche von 1 cm^2 .

cm^3 mit N , so beträgt in der Schicht dx ihre Anzahl $N \cdot dx$; von diesen wird in der Zeit dt der Bruchteil

$$\frac{K \cdot P \cdot q \cdot e^{-Kx} \cdot dx \cdot dt}{N \cdot dx} = \frac{K \cdot P \cdot q \cdot e^{-Kx} \cdot dt}{N}$$

ionisiert. Unter der Annahme, daß die aktiven Zentren denselben Durchmesser wie die inaktiven haben, so daß die Wahrscheinlichkeit,

von einem α -Teilchen getroffen zu werden, für beide dieselbe ist, ist $-dn/n$ der Bruchteil der Zentren, die in der Zeit dt zerstört werden, wenn n ihre Anzahl im cm^3 beträgt. Es ergibt sich somit:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{K \cdot P \cdot q}{N} \cdot e^{-Kx} \cdot dt$$

(sollte der Durchmesser der Zentren größer sein, als der der gewöhnlichen Zinksulfidmoleküle, so würde die Wahrscheinlichkeit, von den α -Strahlen getroffen zu werden, größer sein, und es müßte ein entsprechender Faktor eingefügt werden). Setzt man nun den Faktor

$$\frac{K \cdot P \cdot q}{N} = A,$$

so wird

$$dn/n = -A \cdot e^{-Kx} \cdot dt$$

und

$$n = n_0 \cdot e^{-At} \cdot e^{-Kx},$$

wenn n_0 die zur Zeit $t = 0$ vorhandene Anzahl komplexer Zentren bezeichnet.

Nun ist die Leuchtkraft dJ der Schicht dx proportional $-\frac{dn}{dt} \cdot dx$, so daß man, da es sich hier nur um relative Vergleiche handelt,

$$dJ = -\frac{dn}{dt} \cdot dx$$

setzen kann. Die Absorption des Lichtes darf vernachlässigt werden, da sie sich beim Zerfall nicht ändert, weil ja die Anzahl der komplexen Zentren, verglichen mit der der gewöhnlichen Zinksulfidmoleküle, nur gering ist und sie nur einen Proportionalitätsfaktor bedingen würde. Die Gesamtintensität wird dann:

$$\begin{aligned} J &= -\int_0^{\infty} \frac{dn}{dt} \cdot dx, \\ &= A \cdot \int_0^{\infty} e^{-Kx} \cdot n_0 \cdot e^{-At} \cdot e^{-Kx} \cdot dx, \\ &= \frac{n_0}{K \cdot t} \cdot (1 - e^{-At}), \\ &= \frac{J_0}{A \cdot t} \cdot (1 - e^{-At}), \end{aligned}$$

wo

$$J_0 = \frac{A \cdot n_0}{K} = \frac{P \cdot q \cdot n_0}{N}$$

die Anfangsintensität darstellt; sie ist also, wie nicht anders zu erwarten war, proportional der Anzahl der in der Sekunde ausgesandten α -Teilchen, ihrer Ionisierungsstärke und dem Verhältnis der Anzahl komplexer zu der der gesamten Moleküle. Aus dieser Formel kann man zunächst einen sehr wichtigen Schluß ziehen; verwendet man nämlich eine Leuchtfarbe, welche z mal mehr radioaktive Substanz enthält, so nehmen J_0 und A um das z fache zu, so daß also der Faktor J_0/A ungeändert bleibt. Da der Exponent der Funktion $e^{-A \cdot t}$ um das z fache wächst, so ergibt sich, daß eine hellere Leuchtfarbe auch stärker abfällt. Schreibt man die Gleichung noch in der Form

$$J/J_0 = \frac{1}{A \cdot t} \cdot (1 - e^{-A \cdot t}),$$

so ersieht man, daß bei der Vergrößerung von A um das z fache die Zeit t z mal kleiner werden muß, um denselben prozentualen Rückgang der Helligkeit zu ergeben, mit anderen Worten, eine Leuchtfarbe, die z mal mehr Ra enthält und infolgedessen eine z mal größere Anfangshelligkeit besitzt, sinkt in einer z fach kürzeren Zeit auf denselben Betrag von J/J_0 wie eine Leuchtfarbe der Helligkeit 1.

Zerfällt die radioaktive Substanz selbst, so ergibt sich für das Nachlassen der Intensität [Ableitung bei Rutherford]⁷⁾:

$$J = J_0 \cdot \frac{e^{-\lambda t}}{B \cdot (1 - e^{-\lambda t})} \cdot [1 - e^{-B \cdot (1 - e^{-\lambda t})}],$$

wo

$$B = \frac{A}{\lambda} = \frac{P_0 \cdot q \cdot K}{N \cdot \lambda}$$

ist, wenn P_0 die anfängliche Zahl der α -Teilchen/cm².sec und λ die Zerfallskonstante der radioaktiven Substanz bedeuten. In beiden Fällen tritt also nur eine einzige Unbekannte, A bzw. $B = A/\lambda$ auf.

Der Vergleich mit den Beobachtungen von Marsden gestaltet sich nun insofern schwierig, als auch während der Reifezeit der radioaktiven Substanz, welche bei Marsden, da er von der Em ausging, allerdings nur drei Stunden betrug, bereits eine gewisse Zerstörung des Zinksulfids erfolgt. Rutherford hat nun die Kurven von Marsden rückwärts fortgesetzt und rechnet die Zeit t deshalb schon von einer Stunde nach dem Einfüllen der Em in das Röhrchen. In Tabelle 24 sind die Beobachtungen von Marsden und die Ergebnisse nach der Formel von Rutherford für die

Tabelle 24.

Vergleich zwischen den Beobachtungen von Marsden
und den Berechnungen von Rutherford.

$\alpha/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$	$4 \cdot 10^7$		$2 \cdot 10^8$	
	beobachtet	berechnet	beobachtet	berechnet
0	1,00	1,00	1,00	1,00
5	0,90	0,86	0,78	0,77
10	0,82	0,83	0,63	0,61
20	0,69	0,70	0,44	0,42
30	0,59	0,60	0,315	0,30
40	0,51	0,52	0,22	0,23
50	0,45	0,44 ₅	0,185	0,18
60	0,395	0,39	0,15	0,15
80	0,31	0,30	0,10	0,10
100	0,25	0,24	0,06	0,08
120	0,22	0,19	0,045	0,06

beiden Fälle von $4 \cdot 10^7$ und $2 \cdot 10^8$ α -Strahlen/cm² · sec gegenübergestellt. Zwischen beiden zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung, so daß die Formel von Rutherford zweifelsohne die Beobachtungen recht gut wiedergibt (auch für den Abfall des Willemits liefert sie eine recht gute Übereinstimmung). Damit ist allerdings noch nichts darüber gesagt, wieweit die Voraussetzungen von Rutherford zutreffen, und ob man nicht auf Grund anderer Annahmen gleichfalls zu einer guten Darstellung der Ergebnisse kommen kann. So könnte man z. B. an eine Störung von chemischen Gleichgewichtszuständen durch die α -Strahlen denken, die sich dann aber wohl allmählich wieder zurückbilden würden. Bei dem schnellen Abfall starker Leuchtfarben wären diese aber zunächst zu vernachlässigen. Für die beiden betrachteten Fälle berechnet sich $B = 3$ bzw 12 ; nimmt man die letztere Zahl für $2 \cdot 10^8$ α -Teilchen/cm² · sec, so wird $A = 0,09$ (auf die Stunde bezogen); mit diesem Werte sind dann die Beobachtungen von Marsden umgerechnet, für den Fall, daß die Em nicht zerfallen würde, und, wie vorher erwähnt, in Tabelle 23 wiedergegeben.

Nun kann man den Wert von B auch direkt berechnen. Es ist nämlich für die beiden Fälle $3 \cdot P_0 = 4 \cdot 10^7$ bzw. $2 \cdot 10^8$; $q = 6 \cdot 10^5$; $K = 4,5/R$; $R = 3,7 \cdot 10^{-3}$ cm, wobei das Raumgewicht des Zinksulfids zu 4 vorausgesetzt ist. N ergibt sich aus der Loschmidt-

schen Zahl zu $2,57 \cdot 10^{22}$ und λ ist $= 2,08 \cdot 10^{-6}$, damit wird $B = 1,37 \cdot 10^{-8} \cdot P_0$ (der Wert von B ist übrigens unabhängig von der Dichte s des Zinksulfids, da N proportional und R umgekehrt proportional zu s ist, womit wiederum K proportional s wird, so daß sich die Dichte aus der Formel heraushebt). In der nachfolgenden Tabelle 25 sind für die beiden betrachteten Fälle die berechneten und die beobachteten Werte von B einander gegenübergestellt.

Tabelle 25.

$3 P_0$	beobachtet	berechnet	beob./ber.
$4 \cdot 10^7$	0,18	3,0	17
$2 \cdot 10^8$	0,9	12,0	13

Im Mittel wäre also das Verhältnis beob./ber. = 15 anzusetzen und man muß demnach annehmen, daß die komplexen Moleküle einen 15 mal größeren Durchmesser als die gewöhnlichen Zinksulfidmoleküle haben. Dieser Wert ist durchaus nicht unwahrscheinlich, es sei z. B. daran erinnert (s. 1. Kapitel), daß Lenard bei einem Ca-Bi-Phosphor fand, daß die Kathodenstrahlen noch Elektronen auslösen, wenn sie in einem Abstände vom 32 fachen Atomradius vom Atommittelpunkt vorbeigehen*).

Da unsere Versuche noch nicht weit genug vorgeschritten waren, um das Gesetz für den Abfall, der indessen schon zweifellos beobachtet war, aufzufinden, wurde so verfahren, daß drei Leuchtfarben, die zu verschiedenen Zeiten unter genau gleichen Verhältnissen hergestellt, und deren Ra-Gehalt mit dem Bothe-Apparat zu nicht sehr voneinander abweichenden Werten bestimmt worden waren, mit der Photozelle gemessen wurden. In Tabelle 26 sind ihr Alter, ihr Ra-Gehalt und der beobachtete Photostrom (Helligkeit) mitgeteilt; diese sind auf gleichen Ra-Gehalt (in willkürlichem Maße) bezogen (4. Spalte) und durch eine Kurve ausgeglichen (5. Spalte). Hiernach ist dann das Verhältnis J/J_0 in Prozenten des Anfangswertes festgestellt und daraus A berechnet, das sich in den einzelnen Fällen zu

0,0087; 83; 84; 85; 91; 92,

*) Beim Willemit ergibt sich übrigens das Verhältnis von $B_{\text{beob.}}/B_{\text{ber.}}$ zu 1,8, während es beim Bariumplatincyannür auf den Wert 4700 führt. Hier kann man wohl nur sagen, daß B eine Konstante ist, deren physikalische Bedeutung aber noch aussteht.

im Mittel also zu 0,0087 ergab. Mit diesem Wert von A sind schließlich die Werte von J/J_0 (letzte Spalte) nach der Rutherfordschen Formel ermittelt, wobei sich, abgesehen von dem letzten Wert, eine außerordentlich gute Übereinstimmung ergibt. Nimmt man den Wert $A = 0,0087$ als richtig für eine Leuchtfarbe mit im Mittel 0,2 mg Ra an, so ergeben die in Tabelle 27 mitgeteilten Zahlen die Zeiten [in Jahren (a) und Monaten (m)] für den gleichen prozentualen Abfall von Leuchtfarben verschiedener Zusammensetzung, während in Tabelle 28 und Fig. 20 die Ab-

Tabelle 26.

Beobachtungen an Leuchtfarben verschiedenen Alters.

Alter	Ra-Gehalt	Helligkeit	Hell/Ra		J/J_0	
			ber.	ausgegl.	beob.	ber.
0	—	—	—	24,3	100,0	100,0
16	0,2064	46,20	22,38	22,7	93,4	93,4
54	0,2064	40,90	19,80	19,6	80,6	80,0
55	0,1602	31,90	19,90	19,5	80,3	79,5
93	0,1602	27,60	16,85	16,8	69,2	68,5
245	0,1791	18,12	10,11	9,6	39,5	41,0
283	0,1791	15,13	8,44	8,6	35,4	37,0

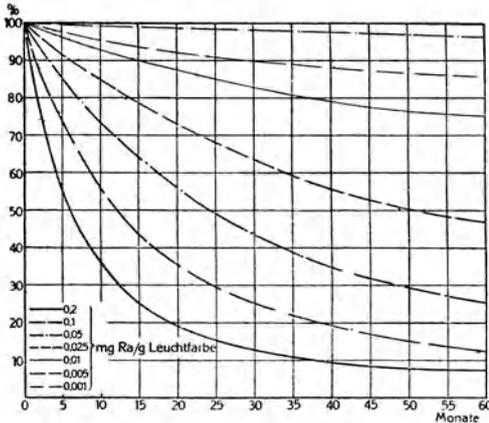
Tabelle 27.

Abnahme der Helligkeit von Ra-Leuchtfarben.

Proz.	0,2		0,1		0,05		0,025		0,01		0,005		0,001 mg Ra/g Leuchtfarbe	
	a	m	a	m	a	m	a	m	a	m	a	m	a	m
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0,8	1,6	3,2	6,4	1 + 4	2 + 8	13 + 4							
80	1,8	3,5	7,0	1 + 2,1	2 + 11	5 + 10	29 + 2							
75	2,3	4,6	9,2	1 + 6,4	3 + 10	7 + 8	38 + 4							
70	3,0	6,0	11,9	1 + 11,8	5	9 + 11	50							
60	4,4	8,7	1 + 5,4	2 + 10,8	7 + 3	14 + 6	72 + 6							
50	6,1	1 + 0,2	2 + 0,4	4 + 0,8	10 + 2	20 + 4	101 + 8							
40	8,4	1 + 4,7	2 + 9,4	5 + 6,8	13 + 11	27 + 10	139 + 2							
30	1 + 0,4	2 + 0,7	4 + 1,4	8 + 2,8	20 + 7	41 + 2	205 + 10							
25	1 + 3,2	2 + 6,4	5 + 0,8	10 + 1,6	25 + 4	50 + 8	253 + 4							
20	1 + 7	3 + 2	6 + 4	12 + 8	31 + 8	63 + 4	316 + 8							
10	3 + 3	6 + 6	13	26	65	130	650							

nahme der Helligkeit innerhalb gleicher Zeiten für die verschiedenen Leuchtfarben mitgeteilt ist. Man ersieht aus jener, daß eine sehr helle Leuchtfarbe von 0,2 mg Ra/g Zinksulfid bereits in einem halben Jahre auf 50 Proz. gesunken ist, bei einer schwächeren Leuchtfarbe von etwa 0,05 mg beträgt der Abfall in dieser Zeit nur 17 Proz., bei der schwächsten berücksichtigten mit 0,001 mg Ra/g Leuchtfarbe sogar nur 0,4 Proz. (es werden also sehr schwache Leuchtfarben innerhalb eines Jahres um weniger als 1 Proz. an Helligkeit nachlassen; diesen würde etwa eine Flächenhelle von $1 \cdot 10^{-7}$ HK/cm² entsprechen). Da nun zu den Adaptometern Leuchtfarben mit etwa $2 \cdot 10^{-7}$ HK/cm² gebraucht werden, so kann

Fig. 20.



Abnahme der Helligkeit verschieden starker Ra-Leuchtfarben.

man tatsächlich ihre Abnahme für lange Zeit hinaus als praktisch verschwindend betrachten und somit mit einer konstanten Helligkeit rechnen.

Die gefundenen Zahlen werden auch dadurch bestätigt, daß eine Leuchtfarbe mit 0,21 mg Ra in vier Monaten auf 56 Proz. abgeklungen war. Nach Tabelle 28 müßte sie noch 62 Proz. Helligkeit aufweisen, der geringe Unterschied rührt da-

her, daß sich die Tabelle auf 0,2 mg Ra bezieht, und daß außerdem die Rechnungen mit Leuchtfarben von zum Teil noch etwas geringerem Ra-Gehalt angestellt worden sind, so daß der nur wenig schnellere Abfall der Leuchtfarbe mit 0,21 mg Ra durchaus verständlich ist*).

*) In sehr guter Übereinstimmung hiermit stehen auch einige gelegentliche Beobachtungen von Bahr (E. T. Z. 40, 299, 1919), nach welchen die Helligkeit einer Leuchtfarbe mit 0,7 mg Rd Th (bezogen auf Radiumbromid) im ersten Monat um 25 Proz., im zweiten um 22 Proz. des jeweiligen Betrages gesunken war, während der erstmonatliche Verlust bei 0,19 mg Rd Th nur 8 Proz. betrug. Da nämlich die angegebenen Rd Th-Mengen etwa 0,4 bzw. 0,1 mg Ra entsprechen,

Tabelle 28.
Abnahme der Helligkeit von Ra-Leuchtfarben.

Zeit		0,2	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001 mg Ra/g Leuchtfarbe
m	a							
0		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1		88,1	93,8	96,3	98,0	99,0	99,7	99,9 ₄
2		77,9	88,1	93,2	96,0	98,0	99,2	99,8 ₈
3 = 1/4		69,9	82,5	90,6	94,5	97,2	98,4	99,8 ₂
4		62,0	77,9	87,9	93,0	96,5	98,0	99,7 ₆
5		55,9	73,5	85,3	91,7	95,9	97,5	99,7 ₀
6 = 1/2		50,5	69,9	82,7	90,4	95,3	97,0	99,6 ₃
9 = 3/4		38,4	59,0	75,5	86,4	93,5	95,8	99,4 ₅
12 = 1		30,8	50,5	69,6	82,5	91,9	94,6	99,2 ₆
18 = 1 1/2		21,2	38,4	59,0	75,6	89,0	92,7	98,8 ₃
24 = 2		15,8	30,8	50,6	69,8	86,1	91,1	98,5 ₂
36 = 3		10,8	21,2	37,6	58,9	80,6	89,0	97,7 ₈
48 = 4		8,5	15,8	30,5	50,8	76,5	87,0	97,0 ₄
60 = 5		7,5	12,7	25,5	46,4	75,0	85,5	96,3 ₀

Der Zerfall bei dem Anstieg der Leuchtfarben, der ja hier einen Monat dauert, läßt sich leider nicht berücksichtigen, da die Rechnung auf unlösbare Integrale führt. Während man andererseits für zerfallende Substanzen, also auch für das Rd Th, die Rechnungen nach der oben mitgeteilten Rutherford'schen Formel ohne weiteres ausführen könnte, ist dies beim Ms Th nicht möglich, da hier auch ein anfänglicher Anstieg der Aktivität vorliegt.

Aus den Beobachtungen und der Theorie ergeben sich eine Reihe wichtiger Folgerungen. Der Wert einer Leuchtfarbe wird einmal abhängen von ihrer Leuchtstärke, die bedingt ist durch ihren Gehalt an radioaktiver Substanz, die Art derselben (Anzahl der α -Teilchen/sec und ihre Ionenerzeugung), sowie die Lumineszenzfähigkeit der Sidotblende, zum zweiten aber auch von ihrer Leuchtdauer, d. h. also von der Lebensdauer des radioaktiven Zusatzes und vor allem von der Widerstandsfähigkeit des Zinksulfids gegen die Strahlung. Unter sonst gleichen Verhältnissen wird diejenige Leuchtfarbe die vorteilhaftere sein, welche dieselbe Leuchtstärke durch einen geringeren radioaktiven Gehalt erzeugt,

so ergibt sich der Rückgang, wie aus Tabelle 28 folgt, in den beiden Monaten zu 24 Proz. bzw. 22 Proz. und bei der schwächeren Leuchtfarbe zu 6 Proz., was eine ausgezeichnete Bestätigung unserer Messungen liefert.

da in diesem Falle die Abnahme ihrer Helligkeit langsamer erfolgt. Es ergibt sich weiterhin die praktische Forderung, die Leuchtstärke nicht durch den Gehalt an Ra, sondern durch Wahl einer größeren Fläche zu steigern, da man dann gleichfalls eine wesentlich größere Lebensdauer erzielt. Ist es nun aber aus bestimmten Gründen nicht möglich, die Fläche zu vergrößern, und verlangt man außerdem eine ungewöhnlich große Helligkeit, so würde es vollständig genügen, RdTh an Stelle von MsTh oder gar Ra der Leuchtfarbe zuzusetzen, da ja doch durch die Zerstörung des Zinksulfids die Leuchtkraft so stark abnimmt, daß sie in verhältnismäßig kurzen Zeiten wieder erneuert werden muß (unter Umständen könnte man auch noch an geeignete Mischungen von MsTh und RdTh denken). Für starke Leuchtfarben ist also die Verwendung von Ra absolut unzweckmäßig; anders liegen die Verhältnisse dagegen bei sehr schwachen Leuchtfarben, bei welchen ja die Leuchtkraft kaum merklich nachläßt; in diesem Fall, aber auch nur in diesem, könnte man eine Verwendung von Ra verantworten; da aber die meisten Instrumente doch keine größere Lebensdauer als etwa zehn Jahre haben, so reicht auch hier eine geeignete MsTh-RdTh-Leuchtfarbe vollkommen aus. Aus volkswirtschaftlichen Gründen wäre es selbst bei den Uhren richtiger, sie etwa alle zehn Jahre erneut mit Leuchtfarbe zu versehen, als hierfür Ra zu verarbeiten.

Ein weiterer Fortschritt würde sich, wie schon erwähnt, durch Verwendung eines besser radiolumineszierenden Zinksulfids oder überhaupt einer anderen, heller leuchtenden und widerstandsfähigeren Substanz erzielen lassen; der Vorteil wäre noch größer, als er zunächst scheint, da man wegen des dann in geringerer Menge nötigen Zusatzes von radioaktiver Substanz noch beträchtlich an Lebensdauer gewinnen würde.

b) Das Spektrum der Leuchtfarbe.

Wie im ersten Kapitel erwähnt, setzt sich das sichtbare Spektrum des phosphoreszierenden Zinksulfids aus einer starken grünen Bande von 580 bis 460 $\mu\mu$ mit einem Maximum bei 510 $\mu\mu$ (nach anderen Angaben bei 520 bzw. 550 $\mu\mu$) und einer schwächeren blauvioletten mit dem Maximum bei 410 $\mu\mu$ zusammen. Bei Leuchtfarben beobachtete Marsden⁶⁾ ein sich von 592 bis 425 $\mu\mu$ kontinuierlich erstreckendes Spektrum mit dem Maximum bei 515 $\mu\mu$, das eine ziemlich scharfe Kante nach Rot hin hatte und nach dem Blau zu allmählich abschwächte. Mit zunehmender Zerstörung des

Zinksulfids nahm die Intensität des blauen Teiles im wesentlich geringeren Maße ab als die der grünen Bande, ohne daß jedoch eine Verschiebung des Maximums bemerkt werden konnte; diese relative Abnahme der grünen Bande wird mit fortschreitender Zerstörung ausgeprägter. Marsden nimmt deshalb an, daß das Schwingungssystem dieser durch die α -Strahlung anders beeinflusst wird als das der grünen Bande. Nach den sonstigen Erfahrungen könnte man vielleicht vermuten, daß die blaue Bande durch die primären und die durch die γ -Strahlen erzeugten sekundären β -Strahlen angeregt wird, welche wegen ihrer geringeren Intensität keine merkliche zerstörende Wirkung ausüben können.

Diese Ergebnisse decken sich auch mit eigenen Versuchen, die mit dem Spektographen angestellt wurden, welcher für die von der Sternwarte der Technischen Hochschule in Charlottenburg und der Optischen Anstalt C. P. Goerz A.-G., Berlin-Friedenau, gemeinsam veranstaltete Expedition nach Norwegen zur Beobachtung der totalen Sonnenfinsternis vom 21. August 1914 für die Aufnahme des lichtschwachen kontinuierlichen Grundes des Koronaspektrums gebaut worden war*). Um eine größere Dispersion zu erzielen, wurde sein Kameraobjektiv mit der Öffnung $f:2$ gegen ein anderes von $f:3,5$ ausgewechselt. Die Aufnahmen erfolgten auf Agfa-Chromo-Isolarplatten, welche, wie die Aufnahme Fig. 21**) mit der zur Eichung der Photozelle benutzten Glühlampe lehrt, bei mittleren Expositionszeiten eine merkliche Empfindlichkeitslücke von 530 bis 500 $\mu\mu$ aufweisen, doch war es wegen des Krieges nicht möglich, besser geeignete Platten zu erhalten (über und unter dem Lampenspektrum befindet sich zum Vergleich das Quecksilberspektrum). Fig. 22 und 23 geben dann das Spektrum einer neuen Ra-Leuchtfarbe und das der Sidotblende; jenes erstreckt sich von 590 bis 410 $\mu\mu$ in recht guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen von Marsden (daß in dem Plattenminimum keine Unterbrechung auftrat, wurde durch Aufnahmen auf Schleußner-Panchroma- und gewöhnlichen Agfa-Trockenplatten bewiesen). Ebenso bestätigen sie seine Angaben über den steilen Abfall nach Rot und das allmähliche Abklingen nach kleineren Wellen hin, dagegen liegt das Maximum bei unseren Versuchen bei 555 $\mu\mu$ und das der blauen Bande bei 460 $\mu\mu$. Das Spektrum der Sidotblende, welches bei

*) Beschreibung siehe: Die totale Sonnenfinsternis vom 21. Aug. 1914, Bericht von A. Miethe, B. Seegert und F. Weidert (Friedr. Vieweg & Sohn, 1916).

**) Die Fig. 21 bis 24 finden sich auf der Tafel am Schluß des Buches.

Dauererregung mit der Quarzquecksilberlampe in einem Quarzrohr beobachtet wurde, erstreckt sich von 610 bis 430 $\mu\mu$ und unterscheidet sich von dem Vorhergehenden im wesentlichen nur durch die im Vergleich zur grünen Bande wesentlich geringere Intensität der blauen, während die Maxima an denselben Stellen liegen. Mit zunehmendem Alter nimmt die Intensität der grünen Bande stärker ab als die der blauen (s. Fig. 24), während weitere Änderungen des Spektrums nicht zu beobachten sind.

Die Leuchtfarbe ist somit außerordentlich günstig, da ihr Maximum mit dem des normalen Auges beim Zapfensehen (550 $\mu\mu$) zusammenfällt. Nun wirken aber schwache Leuchtfarben im wesentlichen nur auf die Stäbchen ein, welche das Maximum ihrer Empfindlichkeit bei 515 $\mu\mu$ haben. Für diesen Zweck wäre es also besser, ein Zinksulfid zu finden, dessen Maximum etwas weiter nach den kürzeren Wellenlängen hin liegen würde.

6. Kapitel.

Die Verwendung der radioaktiven Leuchtfarben.

Die radioaktiven Leuchtfarben finden zweckmäßig überall da Anwendung, wo man auf kleinem Raum einer schwach leuchtenden Lichtquelle ohne äußere Energiezufuhr bedarf. Sie unterscheiden sich dadurch vorteilhaft von den elektrischen Taschenlampen, bei denen der von Zeit zu Zeit notwendige Ersatz der Trockenbatterie zu Schwierigkeiten zu führen vermag, und auch von den phosphoreszierenden Substanzen, die immer einer vorhergehenden Bestrahlung bedürfen, was leicht vergessen werden kann, und die auch kein dauerndes, sondern ein schnell abklingendes Licht aussenden.

Da die radioaktiven Leuchtfarben nur ein verhältnismäßig schwaches Licht liefern, so kommen sie im allgemeinen zur Beleuchtung nur bei vollkommener Dunkelheit und unter Umständen noch in der Dämmerung in Frage. Sie werden also Verwendung finden können zum Markieren von Schaltern, Klingelknöpfen, Türschlössern u. ä., damit diese im Dunkeln leicht aufzufinden sind. Die anfänglichen großen Hoffnungen, welche man darauf gesetzt hatte — dachte man doch daran, Leuchttürme und Tunnels damit zu bestreichen —, haben sich aber nicht erfüllt; das scheiterte, abgesehen von allem anderen, auch an den großen Kosten, die zur

erzielten Wirkung in keinem Verhältnis stehen. Soviel bekannt, ist dieses Verfahren nur an einer Stelle einmal ausgeführt worden: die Radium-Heil-Gesellschaft hat die Wände des Kellerraumes, in welchem die Säcke mit der Joachimstaler Pechblende liegen, mit Zinksulfid austreichen lassen, das unter der Wirkung der von dieser abgegebenen Em und ihrer Zerfallsprodukte für das dunkel adaptierte Auge genügend leuchtet, um die Umrisse von Personen und Gegenständen erkennen zu können.

Ihr Hauptanwendungsgebiet haben die radioaktiven Leuchtfarben bei den Uhren gefunden, da es sehr angenehm ist, nachts die Zeit ablesen zu können, ohne irgend einer sonstigen Lichtquelle zu bedürfen. Hier kommt man mit sehr schwachen Leuchtfarben aus, da das gut (durch mindestens $\frac{1}{2}$ - bis $\frac{3}{4}$ -stündigen Aufenthalt im Dunkeln) dunkel adaptierte Auge wesentlich empfindlicher ist, als das vorher vom Licht gereizte. Ein weiteres Anwendungsgebiet liegt dann in der Kenntlichmachung der Zeigerstellung bei vielen Instrumenten, es seien nur Kompass, Manometer, Höhenmesser, Benzinuhren, ferner Libellen u. ä. genannt, die namentlich bei den nächtlichen Fahrten der Flugzeuge und Luftschiffe viel gebraucht werden. Da in der Luft aber stets, namentlich in den Sommer Nächten, ein gewisses Dämmerlicht herrscht und das Auge folglich nicht so gut dunkel adaptiert sein kann, muß man hier wesentlich hellere Leuchtfarben benutzen, ganz besonders, wenn es sich nicht nur um die Erkennung irgendwelcher Zeichen, sondern um das Lesen von Leuchtzahlen und -buchstaben handelt. Trotzdem kann es vorkommen, daß man bei einem gewissen Stadium der Dämmerung überhaupt nichts sieht, wenn nämlich das Dämmerlicht gerade so hell wie das von der Leuchtfarbe ausgehende ist. Man müßte diese hier eigentlich so hell wählen, daß in dem Augenblick, in welchem das Tageslicht so schwach wird, daß man an den Instrumenten die Zahlen und Zeichen nicht mehr erkennen kann, schon das Licht der Leuchtfarbe sich bemerkbar macht.

Von den genannten Instrumenten hatten, auch schon vor dem Kriege, außer den Leuchtuhren besonders die selbstleuchtenden Marschkompass eine größere Verbreitung gefunden, wie sie zuerst von dem österreichischen Hauptmann Bézard 1902, damals allerdings noch mit phosphoreszierenden Substanzen angegeben worden sind⁹⁾; dieser diente zugleich als Marsch- und Croquierkompaß. Neuere Konstruktionen entstanden dann in England, veranlaßt durch die Bedürfnisse in den Kolonien, die nächtliche Märsche auf unbekanntem und ungebahntem Gelände, quer über Feld und Steppe

oder durch den Wald erforderten. Die verschiedenen Ausführungen unterscheiden sich nur in unwesentlichen Äußerlichkeiten voneinander *). Bei allen macht man durch Leuchtzeichen die vier Haupthimmelsrichtungen und den Deklinationsstrich kenntlich (Fig. 25), auf welchen die auf ihrem Nordende gleichfalls leuchtende Nadel

Fig. 25.



Leuchtmarschkompaß.
Tagesansicht.

Fig. 26.



Leuchtmarschkompaß.
Nachtansicht.

einspielen muß, damit die Verbindungslinie SN die Südrichtung anzeigt. Der wichtigste Teil an dem Marschkompaß ist aber noch der Richtungszeiger, dessen eines Ende mit der dreieckigen Spitze gleichfalls selbstleuchtend ist; er wird nach der Karte oder nach dem Gelände in die Zielrichtung eingestellt, während die Nadel über den Deklinationsstrich spielt, und zeigt damit auch in der Nacht die einzuschlagende Marschrichtung (unter denselben Verhältnissen) an. Fig. 26 gibt die Ansicht des Kompasses bei Nacht (diese Aufnahme wie auch Fig. 28 wurden durch Auflegen auf eine photographische Platte in wenigen Sekunden erhalten). Bei anderen Instrumenten, wie z. B. bei dem in Fig. 27 und 28 wiedergegebenen Höhenmesser macht man die Skalenstriche, den Zeiger und die Ziffern leuchtend.

Als weitere Anwendungen seien genannt Leuchtlupe, bei welchen man den unteren Rand der Fassung auf der Innenseite mit radioaktiver Leuchtfarbe auslegt, deren Licht auf das zu lesende Schriftstück (z. B. Meldekarte) fällt; ferner die verschiedenen Arten von Leuchtvisieren an Schußwaffen

[näheres siehe ¹⁾], wobei man Kimme und Korn mit radioaktiver Leuchtfarbe versieht, um auch in der Dunkelheit oder Dämmerung ein Ziel zu ermöglichen. Dieses Prinzip hat man auch auf die

*) Für eine eingehendere Beschreibung sei auf Berndt²⁾ verwiesen.

Sichtbarmachung der Zielmarken in allen Arten von Zielfernrohren übertragen, indem man die auf einer Glasplatte eingätzten Striche und Punkte mit Leuchtfarbe auslegte oder diese an den entsprechenden Drahtmarken anbrachte. Recht gut bewährt hat sich auch das Verfahren der sogenannten Nachtbeleuchtung, bei welchem man den ganzen Rand der Glasplatte mit Leuchtfarbe umgibt; das von hier ausgehende Licht bleibt infolge der totalen Reflexion in der Glasplatte und tritt nur an den eingätzten Marken und Zeichen aus, so daß diese hell auf dunklem Grunde erscheinen.

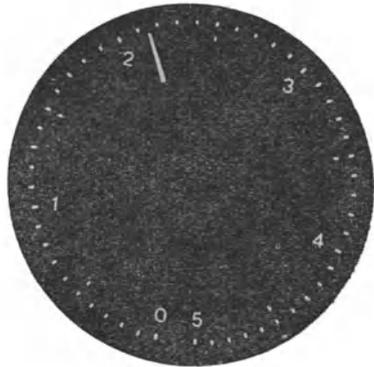
Ganz besonders war der Bedarf an radioaktiven Leuchtfarben im Kriege gestiegen, wo sie außer zu den genannten Zwecken noch

Fig. 27.



Leuchthöhenmesser.
Tagesansicht.

Fig. 28.



Leuchthöhenmesser.
Nachtansicht.

vielfache Verwendung gefunden haben^{2) 5) 6) *}). So wurden die englischen Truppen bei nächtlichen Unternehmungen mit Radiumkragen ausgerüstet, d. h. mit kleinen, selbstleuchtenden, rechteckigen Tuchstücken, die in der Nackengegend befestigt wurden, damit der Hintermann den Anschluß an den Vordermann halten konnte. Ferner nahmen Patrouillen, Krankenträger u. ä. bei nächtlichen Märschen kleine Pfähle mit, die oben eine selbstleuchtende Karte trugen, und welche in die Erde gesteckt wurden, um den Rückweg anzugeben. Auch bei festen Lagern wurde dieses Verfahren in größerem Maßstabe ausgeführt, ja ganze Wege (sowie die Laut-

*) So hat eine einzige Firma in einem Kriegsjahre rund eine halbe Million Leuchtzeichen geliefert.

stege zwischen den Gondeln der Zeppeline) wurden durch Leuchtbänder auf dem Boden gekennzeichnet und auch Hindernisse und die Quartiere wichtiger Personen dadurch kenntlich gemacht, um sie nachts leicht bemerken zu können. Weitere Anwendungen waren Leuchtscheiben für den Flugdienst und die Markierung der Sperrnetze gegen U-Boote, deren gläserne als Schwimmer dienende Hohlkugeln mit Leuchtmasse gefüllt wurden.

Neuerdings werden sehr schwache Ra-Leuchtfarben als konstante Lichtquellen vielfach bei Adaptometern zur Prüfung der Dunkelempfindlichkeit des Auges benutzt. So verwendet Braunschweig⁴⁾ eine Tafel mit fünf verschieden großen Punkten und läßt die zu untersuchende Person so lange rückwärts gehen, bis gerade der kleinste Leuchtpunkt nicht mehr sichtbar ist. Stargardt⁷⁾ wendet gegen dieses Verfahren ein, daß dabei nicht immer gleiche Netzhautteile untersucht werden, und benutzt deshalb eine selbstleuchtende Fläche von $\frac{1}{120}$ MK, deren Helligkeit durch aufgelegte Papierblenden in bestimmter Weise geschwächt wird, während Best⁷⁾ eine Mattscheibe benutzt, welche durch einen Leuchtschirm aus verschiedenen Entfernungen beleuchtet wird, und deren Fläche noch durch Blenden verkleinert werden kann. Außerdem hat Bloch sie als konstante Vergleichslichtquelle bei einem kleinen Taschenstraßenphotometer²⁾ benutzt, dessen Meßbereich durch einfache Schieberumschaltung sich von 1000 bis 0,1 Lux erstrecken läßt. Ein sehr schwer wiegender Nachteil ist aber die allmähliche Abnahme der Lichtstärke der Leuchtfarbe, so daß das Photometer, selbst bei geringen Ansprüchen an Genauigkeit, alle paar Wochen neu geeicht werden muß; bei Laboratoriumsmessungen hätte dies sogar vor jeder Meßreihe zu geschehen.

Nach den Ergebnissen des 5. Kapitels wird man die Leuchtfarben der größeren Helligkeit wegen möglichst als Pulver ohne Bindemittel verwenden, man muß sie dann aber, um die Em und ihre Zerfallsprodukte ansammeln zu können, in eine gasdichte und naturgemäß durchsichtige Hülle einschließen. Hierfür kommen in Frage zugeschmolzene Glasröhren und -kapillaren, unter Umständen von elliptischem Querschnitt, ferner zugeklebte Röhrchen geeigneter Form aus Celluloid oder Cellon. Sehr gut ist auch das (durch D. R.-P. geschützte) Verfahren, in einen polierten durchsichtigen Stoff, z. B. Celluloid, die entsprechenden Vertiefungen einzuprägen, ihn mit Ausnahme dieser mit einem Farbstoff (weißen oder schwarzen Emaillack) oder nach dem Metallspritzverfahren undurchsichtig zu machen, dann die Vertiefungen mit Leuchtfarbe

auszufüllen und ihn schließlich mit einem gummierten Stoff auf der Rückseite zu verkleben. Naturgemäß könnte man auch die Ziffern, Buchstaben usw. schwarz lassen und die Umgebung auf die angeführte Weise selbstleuchtend machen, doch wird diese Ausführung im allgemeinen an dem zu hohen Preise scheitern. Man kann auch umgekehrt verfahren und die Vertiefungen in das Papier einprägen, das man nach der Ausfüllung mit Leuchtfarbe mit Celluloid oder Cellon überklebt.

Trotz des Verlustes an Helligkeit wird aber noch sehr viel, namentlich bei Uhren, das Verfahren gebraucht, die pulverförmige Leuchtfarbe in einem alkalischen Lack (Säuren greifen das Zinksulfid an) aufzuschlämmen und diese Farbe mit einem Pinsel oder Glasstäbchen auf das Zifferblatt oder in entsprechende Vertiefungen zu bringen. Man kann auf diese Weise alle beliebigen Zeichen (also auch Ziffern und Buchstaben) malen. Bei dieser Methode ist darauf zu achten, daß das Bindemittel nach dem Trocknen einen luftdichten Abschluß über den Leuchtzeichen bildet (weshalb man sie vielfach nach dem Trocknen auch noch mit einem [zweckmäßig abwaschbaren] Decklack überzieht), andererseits darf es aber auch nicht zu dick sein, da es sonst die α -Strahlen absorbiert und sie nicht zur Wirksamkeit auf das Zinksulfid kommen läßt. Ein ideales Bindemittel für diese Zwecke wären die aus reiner Nitrocellulose hergestellten Lacke²⁾, da sie unter Bildung eines nur sehr geringen Rückstandes nach dem Verdunsten des Lösungsmittels der Leuchtfarbe eine große Klebkraft verleihen; trotzdem haben sie sich nicht eingebürgert, da sie nach dem Eintrocknen eine unschöne Oberfläche liefern. Man verwendet deshalb — trotz des großen Lichtverlustes — harzhaltige Lacke, sowie hoch viskose Stoffe, welche beim Eintrocknen nicht zu spröde werden, da sonst die Leuchtfarbe von der Unterlage abspringt. Fast jede einzelne Firma hat hier ihre besonderen Erfahrungen und gibt meist das nach ihrer Ansicht beste Bindemittel den Leuchtfarben bei. Bei den harzhaltigen Lacken ist infolge der Oxydation an der Luft ein gewisses Nachdunkeln zu befürchten. Es ist auch ein patentiertes Druckverfahren vorgeschlagen, nach welchem man den Druckstock mit Leuchtfarbe, die mit Dammlack und Lavendelöl aufgeschlämmt ist, einreibt, ihn auf mit Glycerin gewaschener Gelatine abdruckt, auf welche die Leuchtfarbe übergeht, worauf man den Abdruck mit Weinsteinpulver einstäubt und gegen das mit Zaponlack gestrichene Zifferblatt preßt. Es wird diesem Verfahren nachgerühmt, daß man damit

noch feine Linien erzeugen und die Skalen fabrikmäßig herstellen kann. Zu befürchten bleibt allerdings, daß die Helligkeit sehr gering ausfallen wird, da man nur verhältnismäßig kleine Mengen von Leuchtfarbe in dem Lack aufschlämmen kann.

Eine sehr große Bedeutung haben auch Leuchtschirme gewonnen, bei welchen man das Leuchtpulver mit einem Bindemittel auf Papier aufträgt, und die man gleichfalls durch einen geeigneten Decklack abwaschbar machen kann; aus diesen werden die gewünschten Zeichen ausgeschnitten oder ausgestanzt, was natürlich stets mit einem Materialverlust verbunden ist [außerdem tritt ja auch eine ziemliche Helligkeitsverminderung ein, s. 5. Kapitel, a) 4]. Man hat auch versucht, die Leuchtfarben mit Cellulose, Gelatine, Cellon u. ä. zu vermischen und aus diesen Platten zu schneiden; so empfiehlt M. v. Waldheim⁸⁾ ein Gemisch aus 100 Teilen Casein, 10 Teilen Chlorhydrin, 30 Teilen Aceton mit 50 Teilen Leuchtfarbe. Diese Masse läßt sich in Platten von beliebiger Länge und Breite walzen, die dann als Wandbelag Verwendung finden sollen. Von anderen Seiten werden Lösungen von Celluloseestern, Viskose oder den polymeren Kondensationsprodukten der Acrylsäurereihe vorgeschlagen, welchen nachgerühmt wird, daß sie mit dem Zinksulfid nicht in Reaktion treten, und daß auch das bei der Verwendung von Zaponlack beobachtete Gelatinieren bei ihnen erst nach mehreren Stunden erfolgen würde, wenn nicht inzwischen das Lösungsmittel schon verdampft wäre. Nach einem D. R.-P. von de Haën kann man Zinksulfid sehr gut an Stelle von Zinnoxid als Trübungsmittel von guter Deckkraft bei Emaille gebrauchen und so bei Benutzung radioaktiver Leuchtfarben selbstleuchtende Emailen herstellen. Ein Nachteil liegt nur darin, daß der Gehalt an Leuchtfarbe außerordentlich klein ist, so daß man auf diese Weise keine größeren Lichtstärken erzielen kann. Hinzu kommt ferner, daß bei den hohen Temperaturen des Emailleschmelzprozesses die Phosphoreszenzfähigkeit des Zinksulfids außerordentlich stark zurückgeht.

7. Kapitel.

Statistik und Ökonomie der Leuchtfarben.

a) Statistik.

Nach W. Petraschek⁷⁾ sollen auf der ganzen Erde nur 425 g abbauwürdiges Ra, davon allein 180 g⁸⁾ in Joachimstal vorhanden sein. Die Jahresproduktion betrug hier 1909 0,948 g, 1914 2,126 g. Wesentlich gesteigert ist sie durch die Auffindung des Carnotits, der seit der Kriegszeit ausschließlich in den Vereinigten Staaten verarbeitet wird. Nach Hennig³⁾ betrug die Jahreserzeugung in den Vereinigten Staaten und aus den in Europa verarbeiteten amerikanischen Erzen im Jahre 1914 schon 22,4 + 7,5 = 29,9 g. Für die Kriegszeit liegen leider noch keine weiteren Daten vor, doch ist sicherlich anzunehmen, daß, namentlich in den Vereinigten Staaten, die Produktion wesentlich gesteigert ist. Ein weiteres Anwachsen ist bei der Verarbeitung der uran-vanadiumhaltigen Erze auf das in der Stahlindustrie gebrauchte Vanadium zu erwarten, bei welcher das Uran gewissermaßen als Nebenprodukt abfallen würde. Dazu kommt noch der Gewinn an MsTh aus den jährlich verarbeiteten Thormineralien, der nach dem 2. Kapitel maximal jährlich 42 mg Gewicht, also etwa 12,6 g γ -Äquivalent betragen kann.

Ganz außerordentlich ist die Preissteigerung, welche das Ra genommen hat und die nachfolgend nach Henrich⁴⁾ wiedergegeben werden soll. Es kostete 1 mg Ra-Element

1902, 15. September	9,30	M.
1902 später	15	„
1903	22	„
1904	37 bis	93 „
1905	93	„ 186 „
1906	224	„
1909/10	280 bis	10 „
1911/12	560	„ 600 „
1912/14	650	„ 700 „
Im Kriege	etwa	800 „

Der heutige Preis ist nicht durch die allerdings sehr hohen Herstellungskosten bedingt (wozu kommt, daß einige Ausgangsmaterialien monopolisiert und dementsprechend teuer sind), sondern durch das Radiumfieber. Der hohe Preisanstieg im Jahre 1910 ist nämlich im wesentlichen verursacht durch die das Angebot weit übersteigende Nachfrage der Krankenhäuser und Kliniken,

welche Ra und MsTh zu medizinischen Bestrahlungen, namentlich zur Bekämpfung der Krebskrankheit, suchten, wozu etwa 60 g angefordert wurden. Der Preis des MsTh betrug vor dem Kriege etwa 250 M. für 1 mg γ -Äquivalent.

Tabelle 29.

Menge der jährl. in der Physik.-Techn. Reichsanst. geprüften radioaktiven Präparate (in Milligramm γ -Äquivalent).

Jahr	Radium	Mesothor
1912	24,6	1,7
1913	1921	350
1914	7049	1181
1915	1770	1421
1916	365	850
1917	838	1331
1918	1454	399

Radioaktive Leuchtfarben wurden zuerst von der Chininfabrik Buchler & Co. in Braunschweig auf den Markt gebracht, während das erste MsTh von den Firmen Knöfler & Co. in Plätzensee und der Deutschen Gasglühlicht-(Auer-)Gesellschaft, die dann dafür die Gesellschaft für Verwertung chemischer Produkte abzweigte, in den Handel kam. Wie außerordentlich groß die Verarbeitung radioaktiver Substanzen für Leuchtfarbe geworden ist, folgt aus einer Bemerkung von Walter⁹⁾, nach welcher er in drei Monaten für 250 000 M. Leuchtfarben, und zwar überwiegend MsTh-haltige, geprüft hat. Auch die Statistik der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt über die von ihr geprüften radioaktiven Präparate (s. Tabelle 29) ist hierfür ein beredtes Zeugnis. Der große Anstieg im Jahre 1914 ist auf den medizinischen Bedarf zurückzuführen, die Zunahme um etwa 500 mg Ra und 500 mg MsTh vom Jahre 1916 auf 1917 ist aber ausschließlich durch die Verwendung in der Leuchtfarbenindustrie bedingt. Wenn man bedenkt, daß bei weitem nicht alle Präparate geprüft worden sind, so kann man den Jahresverbrauch allein in Deutschland zu diesem Zweck in den letzten Jahren zu mindestens 2 g Ra und 2 g MsTh angeben*), welche, selbst nach dem Friedenspreise

*) Es betrug der Umsatz einer der größten Firmen im Jahre 1918 etwa 1250 mg RdTh und 500 mg Ra und in neun Monaten des Jahres 1915 fast 18 kg Leuchtfarben verschiedener Helligkeit.

gerechnet, einen Wert von 2 Millionen Mark allein für das Rohmaterial darstellen. Demgegenüber verschwinden die Kosten für das Zinksulfid (das 1914 etwa 100 M./kg kostete) vollständig, so daß man für eine bessere Sidotblende ein Mehrfaches dieses Preises bewilligen kann, wodurch die Leuchtfarben sogar billiger werden könnten. Wenn man demgegenüber bedenkt, daß man die Leuchtfarbe für zehn Uhren einschließlich Zubehör zur Verarbeitung für 5,50 M., die Leuchtmasse allein für 5 M. erhält, so kann man daraus entnehmen, wie wenig Ra oder MsTh diese nur enthalten kann (schätzungsweise höchstens $\frac{1}{100}$ mg MsTh). Das ist aber bei weitem noch nicht die billigste Leuchtmasse, wird doch 1 g, ausreichend für 100 Uhren, schon für 3 M. angeboten, so daß der Gehalt auf weniger als $\frac{1}{200}$ mg MsTh und für eine einzelne Uhr auf $5 \cdot 10^{-4}$ mg MsTh geschätzt werden kann. Eine gesundheitliche Schädigung durch die γ -Strahlen dieser winzigen Mengen ist dabei natürlich nicht zu befürchten. Andererseits steigt der Preis sehr heller Leuchtmassen entsprechend ihrem hohen Gehalt an radioaktiven Substanzen auf mehrere hundert Mark für das Gramm.

b) Die Ökonomie der Leuchtfarben.

Zum Schluß soll noch die Ökonomie der Radiumbeleuchtung untersucht werden. Marsden⁶⁾ bestimmte den Wärmeeffekt der zu seiner Untersuchung benutzten Röhre mit Zinksulfid und Em nach einer Differentialkalorimetermethode und maß ihre Wärmeerzeugung einmal, wenn die Röhre mit schwarzem Papier bedeckt war, so daß auch die Lichtstrahlen absorbiert und in Wärme verwandelt wurden, und ferner im unbedeckten Zustande. Es ergab sich so, daß 1,5 Proz. der Energie der α -Strahlen in Licht verwandelt wurde, doch wird der Betrag tatsächlich etwas größer sein, da auch das Zinksulfid bereits einen Teil* des Lichtes absorbiert. Wir wollen nun die Rechnung im Anschluß an Bahr¹⁾ für den von uns gefundenen Wert von $11 \cdot 10^{-6}$ HK/cm² für eine Leuchtfarbe mit 0,1 mg Ra/g Zinksulfid bei 0,2 mm dicker Schicht mit einer Menge von 0,1 g Leuchtfarbe durchführen. Es erzeugt 1 g Ra 132,75 g-cal/Stunde, also 0,1 mg

$$\frac{1 \cdot 10^{-4} \cdot 132,75 \cdot 427 \cdot 981 \cdot 100}{3600} \cdot 10^{-3} = 1,54 \cdot 10^{-5} \text{ Watt.}$$

1 g Leuchtfarbe würde unter den angegebenen Verhältnissen 10 cm²

bedecken und demnach eine Helligkeit von $11 \cdot 10^{-5}$ HK liefern. Es würde somit der spezifische Verbrauch

$$\vartheta = \frac{1,54 \cdot 10^{-5}}{11 \cdot 10^{-5}} = 0,14 \text{ Watt/HK}$$

betragen. Nun ist dieser nach Meyer⁶⁾

für eine monochromatische Lichtquelle, die nur Licht der Wellenlänge $550 \mu\mu$ aussendet, $\vartheta = 0,0138$,

für eine Lichtquelle, die nur Licht im sichtbaren Spektrum aussendet, $\vartheta = 0,04$,

somit würde für die Leuchtfarbe etwa $\vartheta = 0,02$

anzusetzen sein, da sich ihr Licht fast ganz auf das sichtbare Spektrum, aber mit einem ausgesprochenen Maximum bei $550 \mu\mu$, verteilt.

Danach ergibt sich die visuelle Ökonomie

$$\eta = \frac{0,02}{0,14} \cdot 100 = 15 \text{ Proz.}$$

Vergleicht man damit die visuellen Ökonomien einiger anderer Lichtquellen nach Coblentz³⁾ (s. Tabelle 30), so ersieht man, daß die Leuchtfarbe selbst noch die Effektbogenlampe um die Hälfte übertrifft und also die günstigste künstliche Lichtquelle darstellt.

Tabelle 30.

Visuelle Ökonomie verschiedener Lichtquellen.

Lichtquelle	η
Leuchtkäfer	96,5 Proz.
Leuchtfarbe	15 „
Effektbogenlampe	10 „
Quecksilberbogenlampe	3,8 „
Osramlampe	1,3 „
Kohlefadenglühlampe	0,43 „

Trotzdem würde die Beleuchtung mit radioaktiven Leuchtfarben außerordentlich teuer werden. Zur Erzielung von 1 HK braucht man 10^4 g Leuchtfarbe mit 0,1 mg Ra/g Zinksulfid, also 1 g Ra zum Preise von 600000 M. (Friedenspreis). Rechnet man hierfür eine Verzinsung von 5 Proz. und eine Amortisation von 10 Proz. (wegen der Zerstörung des Zinksulfids und der Unmöglichkeit der

Wiedergewinnung bei schwachen Leuchtfarben), so würden die jährlichen Unkosten 90000 M./HK betragen. Dabei ist noch vorausgesetzt, daß es sich um eine außerordentlich schwache Leuchtfarbe handelt, bei welcher der Lichtabfall während der zehn Jahre praktisch zu vernachlässigen ist; bei helleren Leuchtfarben müßte man noch die starke Abnahme der Helligkeit berücksichtigen, welche ja bei diesen schon in einem halben Jahre 50 Proz. betragen kann. Aber selbst bei schwachen Leuchtfarben wird man unter Berücksichtigung des Abfalles die jährlichen Unkosten auf mindestens 100000 M. ansetzen müssen.

Bei einer RdTh-Leuchtfarbe würde man mit 0,66 g γ -Äquivalent auskommen, die einen Wert von 165000 M. darstellen. Berücksichtigt man indessen, daß man noch die gleiche Menge MsTh zusetzen muß, um eine genügende Konstanz über zehn Jahre zu erhalten, so würde der Anschaffungspreis 330000 M., die jährlichen Unkosten 50000 M., und unter Berücksichtigung des allmählichen Abfalls der Helligkeit selbst bei schwachen Leuchtfarben etwa 60000 M. betragen.

Bedenkt man nun, daß eine gute Metallfadenlampe 1 Watt/HK braucht, so würden die jährlichen Stromkosten bei einem Preise von 40 Pfg. für die kWh 3,50 M./HK betragen. Nun ist die mittlere Brenndauer einer Lampe etwa 500 Stunden, so daß man im Jahre 17,5 Lampen zu $2,50 = 43,75$ braucht; zusammen würden also die jährlichen Beleuchtungskosten 50 M./HK betragen. Es kann somit die Radiumbeleuchtung nur da in Frage kommen, wo ihre Vorteile so groß sind, daß diesen gegenüber die Kosten keine Rolle spielen.

Tabelle I.

Radioaktive

Uran-Radiumreihe					Actinium	
Substanz	λ in s^{-1}	Halbwertzeit	Mittlere Lebensdauer	Strahlen	Substanz	λ in s^{-1}
U I	$4 \cdot 10^{-18}$	$5 \cdot 10^9$ a	$7,2 \cdot 10^9$ a	α		
U X ₁	$3,26 \cdot 10^{-7}$	23,5 d	33,9 d	$\beta\gamma$		
U X ₂	$9,9 \cdot 10^{-4}$	66 s	1,69 m	$\beta\gamma$		
U II	etwa 10^{-14}	etwa $2 \cdot 10^6$ a	etwa $3 \cdot 10^6$ a	α		
					U Y	$7,55 \cdot 10^{-6}$
					Proto Ac	
					Ac	$1,0 \cdot 10^{-9}$
					Rd Ac	$4,25 \cdot 10^{-7}$
Jo	$2,2 \cdot 10^{-13}$	etwa 10^5 a	etwa 10^5 a	α		
Ra	$1,26 \cdot 10^{-11}$	1733 a	2500 a	$\alpha\beta\gamma$	Ac X	$6,9 \cdot 10^{-7}$
Ra Em	$2,08 \cdot 10^{-6}$	3,85 d	5,56 d	α	Ac Em	$1,77 \cdot 10^{-1}$
Ra A	$3,78 \cdot 10^{-3}$	3,05 m	4,40 m	α	Ac A	$3,5 \cdot 10^2$
Ra B	$4,33 \cdot 10^{-4}$	26,8 m	38,66 m	$\beta\gamma$	Ac B	$3,20 \cdot 10^{-4}$
Ra C	$5,93 \cdot 10^{-4}$	19,5 m	28,1 m	$\alpha\beta\gamma$	Ac C	$5,33 \cdot 10^{-3}$
Ra C'' (0,03 Proz.)	$8,4 \cdot 10^{-3}$	1,38 m	1,99 m	$\beta\gamma$	Ac C'' (99,85 Proz.)	$2,45 \cdot 10^{-3}$
Ra C' (99,97 Proz.)	etwa $2,5 \cdot 10^6$	etwa 10^{-7} s	etwa 10^{-6} s	α	Ac C' (0,15 Proz.)	140
Ra D	$1,37 \cdot 10^{-9}$	16 a	23,08 a	$\beta\gamma$	Ac D	
Ra E	$1,66 \cdot 10^{-6}$	4,85 d	7,00 d	$\beta\gamma$?	
Ra F	$5,88 \cdot 10^{-8}$	136,5 d	196,9 d	α		
Ra G		inaktiv				

Familien.

reihe			Thorreihe				
Halbwertzeit	Mittlere Lebensdauer	Strahlen	Substanz	λ in s^{-1}	Halbwertzeit	Mittlere Lebensdauer	Strahlen
etwa 25,5 h 1200—180 000	36,8 h	β					
		α					
etwa 20 a	etwa 29 a	β	Th	$1,7 \cdot 10^{-18}$	$1,3 \cdot 10^{10}$ a	$1,9 \cdot 10^{10}$ a	α
			Ms Th ₁	$4,0 \cdot 10^{-9}$	5,5 a	7,9 a	(β)
			Ms Th ₂	$3,1 \cdot 10^{-6}$	6,2 h	8,9 h	$\beta \gamma$
18,9 a	27,24 d	$\alpha \beta \gamma$	Rd Th	$1,09 \cdot 10^{-8}$	2,0 a	2,9 a	$\alpha \beta$
11,6 d	16,7 d	α	Th X	$2,20 \cdot 10^{-6}$	3,64 d	5,25 d	α
3,92 s	5,66 s	α	Th Em	$1,27 \cdot 10^{-2}$	54,53 s	78,7 s	α
$2 \cdot 10^{-3}$ s	$3 \cdot 10^{-3}$ s	α	Th A	4,95	0,14 s	0,20 s	α
36,1 m	52,1 m	$\beta \gamma$	Th B	$1,82 \cdot 10^{-5}$	10,6 h	15,3 h	$\beta \gamma$
2,15 m	3,12 m	$\alpha \beta \gamma$	Th C	$1,90 \cdot 10^{-4}$	60,8 m	87,7 m	$\alpha \beta \gamma$
4,71 m	6,8 m	$\beta \gamma$	Th C''	$3,73 \cdot 10^{-3}$	3,1 m	4,47 m	$\beta \gamma$
etwa $5 \cdot 10^{-3}$ s	etwa $7 \cdot 10^{-3}$ s	α	(35 Proz.) Th C'	etwa 10^{11}	etwa 10^{-11} s	etwa 10^{-11} s	α
			(65 Proz.) Th D				
			↓ ?				

Literaturverzeichnis.

1. Kapitel. Phosphoreszenz.

- 1) E. Becquerel, La lumière.
- 2) H. Becquerel, C. R. **113**, 618, 1891.
- 3) F. H. Gley, (Ref.) E. T. Z. **39**, 408, 1908.
- 4) H. Hinterberger, Wien. Mitteil. Phot. Inhaltes, 1917, S. 225.
- 5) K. A. Hofmann und W. Ducca, Chem. Ber. **37**, 3407, 1904.
- 6) H. E. Ives und M. Luckiesch, Phys. Rev. **34**, 156, 1912.
- 7) P. Lenard und A. Klatt, Ann. d. Phys. **15**, 225, 1904.
- 8) Derselbe und S. Saeland, ebenda **28**, 476, 1909.
- 9) Derselbe, ebenda **31**, 641, 1910.
- 10) Derselbe, Heidelb. Ber. 1912, 5. Abhdlg.
- 11) Derselbe und W. Hauser, ebenda, 12. Abhdlg.
- 12) E. L. Nichols und E. Merritt, Phys. Rev. **21**, 247, 1905.
- 13) Dieselben, ebenda, S. 411, 1905.
- 14) Dieselben, ebenda **22**, 279, 1906.
- 15) Dieselben, ebenda **23**, 37, 1906.
- 16) Dieselben, ebenda **27**, 367, 1908.
- 17) Dieselben, ebenda **28**, 349, 1909.
- 18) Dieselben, ebenda **32**, 38, 1911.
- 19) W. E. Pauli, Ann. d. Phys. **34**, 739, 1911.
- 20) A. Pierce, Phys. Rev. **25**, 312, 1908.
- 21) Derselbe, ebenda **30**, 663, 1910.
- 22) Derselbe, ebenda **32**, 115, 1911.
- 23) C. W. Waggoner, ebenda **27**, 209, 1908.
- 24) M. v. Waldheim, Chem. Techn. Rezept-Taschenbuch.
- 25) A. Werner, Ann. d. Phys. **24**, 164, 1907.
- 26) Derselbe und H. Gohdes, ebenda **30**, 257, 1909.
- 27) E. Wiedemann, Wied. Ann. **37**, 177, 1889.
- 28) E. Wiedemann und G. C. Schmidt, ebenda **56**, 177, 1895.
- 29) A. Zeller, Phys. Rev. **31**, 367, 1910.
- 30) Anonym, Zeitschr. f. phys. u. chem. Unter. **28**, 43, 1915.

2. Kapitel. Radioaktivität.

Lehrbücher.

- 1) P. Curie, Die Radioaktivität, deutsche Ausgabe, 2 Bd., 1911.
- 2) F. Henrich, Chemie und chem. Technologie rad. Stoffe, 1918.
- 3) St. Meyer und E. v. Schweidler, Radioaktivität 1916.
- 4) E. Rutherford, Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen (Handb. d. Radiologie, Bd. 2) 1913.

Abhandlungen.

- 5) H. Becquerel, C. R. **129**, 912, 1899.
- 6) G. T. Beilby, Proc. Roy. Soc. (A) **74**, 506, 511, 1905.
- 7) J. Borgmann, C. R. **124**, 895, 1897.
- 8) Crookes und Dewar, Proc. Roy. Soc. (A) **72**, 69, 1903.
- 9) F. Giesel, Wied. Ann. **69**, 91, 1899.

- 10) Derselbe, Chem. Ber. **38**, 775, 1908.
- 11) E. Marsden, Proc. Roy. Soc. (A) **83**, 548, 1910.
- 12) L. Meitner, Phys. Zeitschr. **19**, 262, 1918.
- 13) A. Pierce, Phys. Rev. **25**, 312, 454, 1908.
- 14) E. Rutherford, Proc. Roy. Soc. (A) **83**, 561, 1910.
- 15) R. W. Wood, Phil. Mag. (6) **10**, 427, 1905.

3. Kapitel. Meßmethoden.

a) Radioaktive Messungen.

- 1) St. Meyer und E. v. Schweidler, Radioaktivität 1916.
- 2) W. Bothe, Phys. Zeitschr. **16**, 33, 1915.
- 3) H. Greinacher, ebenda **12**, 210, 1911.
- 4) V. Hess, Verh. d. D. Phys. Ges. **15**, 1002, 1913.
- 5) C. W. Lutz, Münch. Ber. **37**, 60, 1907; Phys. Zeitschr. **9**, 100, 642, 1908; **13**, 954, 1912; **17**, 619, 1916; **29**, 27, 1909.
- 6) Th. Wulf, Phys. Zeitschr. **8**, 246, 527, 780, 1907; **10**, 251, 1909.
- 7) Derselbe, ebenda **15**, 240, 1914.

b) Lichtmessungen.

- 1) E. Liebenthal, Praktische Photometrie 1907.
- 2) F. Bahr, Zeitschr. f. Beleuchtungswesen **22**, Heft 21/22, 1916.
- 3) H. Becquerel, C. R. **129**, 912, 1899.
- 4) W. E. Dorsey, Wash. Ac. Sc. **7**, 1, 1917.
- 5) F. H. Gley, (Ref.) E. T. Z. **39**, 408, 1918.
- 6) E. Marsden, Proc. Roy. Soc. (A) **83**, 548, 1910.
- 7) P. Metzner, Verh. d. D. Phys. Ges. **20**, 183, 1918.
- 8) B. Walter, D. Opt. Wochenschr. 1915/16, S. 537, 556.

Photozelle.

- 9) G. Barkow, Phys. Zeitschr. **18**, 214, 1917.
- 10) H. Dember, Verh. d. D. Phys. Ges. **13**, 313, 1911.
- 11) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zeitschr. **14**, 741, 1913.
- 12) P. Guthnick und R. Prager, Veröff. d. K. Sternwarte zu Neubabelsberg **1**, Heft 1, 1914.
- 13) H. E. Ives, Electrical World **69**, Nr. 3, 1917.
- 14) J. Kunz und J. Stebbins, Phys. Rev. **7**, 62, 1916.
- 15) Ph. Lenard, Heidelb. Ber. (A) 1912, 5. Abhdlg.
- 16) R. Pohl und P. Fringsheim, Die lichtelektr. Erscheinungen, 1914.
- 17) F. K. Richtmyer, Phys. Rev. **30**, 394, 1910.
- 18) W. F. Schulz, Astrophys. Journ. **38**, 187, 1913.

5. Kapitel. Helligkeit der Leuchtfarbe.

Schichtdicke, Radiumgehalt, Photometrie, Leuchtschirm, Vorbelichtung [Abschn. a) 1 bis 5].

- 1) F. Bahr, Zeitschr. f. Beleuchtungsw. **22**, Heft 21/22, 1916; E. T. Z. **40**, 299, 1919; Journ. f. Gasbeleuchtung u. Wasserversorgung 1918, Nr. 51 u. 52.

- ²⁾ N. E. Dorsey, Wash. Ac. Sc. 7, 1, 1917.
- ³⁾ F. H. Gley, (Ref.) E. T. Z. **39**, 408, 1918.
- ⁴⁾ P. Metzner, Verh. d. D. Phys. Ges **20**, 183, 1918.
- ⁵⁾ K. Stargardt, Münch. Med. Wochenschr. **33**, 1918.
- ⁶⁾ B. Walter, D. Opt. Wochenschr. 1915/16, S. 537, 556.
- ⁷⁾ Anonym, Zeitschr. d. D. Ges. f. Mech. u. Optik 1918, S. 30.

Abklingen der Leuchtfarbe und Spektrum
[Abschn. a) 6 und Abschn. b)].

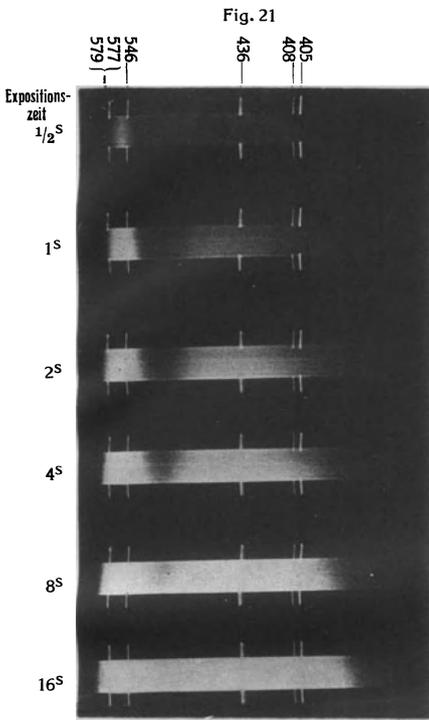
- ¹⁾ M. Arndt, Ctr.-Ztg. f. Optik u. Mech. **37**, 389, 1916.
- ²⁾ Ges. f. Verw. chem. Prod. D. Opt. Wochenschr. 1915/16, S. 392.
- ³⁾ F. H. Gley, (Ref.) E. T. Z. **39**, 408, 1918.
- ⁴⁾ F. Henrich, Chemie u. chem. Technologie rad. Stoffe, 1918.
- ⁵⁾ Junghans, D. Opt. Wochenschr. 1915/16, S. 324.
- ⁶⁾ E. Marsden, Proc. Roy. Soc. (A) **83**, 548, 1910.
- ⁷⁾ E. Rutherford, ebenda, S. 561, 1910.
- ⁸⁾ J. Schaefer, Ker. Rundsch. **15**, 75, 1917.
- ⁹⁾ H. Schneider, D. Uhrm.-Ztg. 1916, S. 97.
- ¹⁰⁾ K. Stargardt, D. Opt. Wochenschr. 1919, S. 113.
- ¹¹⁾ Anonym, D. Uhrm.-Ztg. 1916, S. 72 und 84.
- ¹²⁾ Anonym, L'actualité scientifique 1918, S. 345.
- ¹³⁾ Anonym, Zeitschr. d. D. Ges. f. Mech. u. Optik 1918, S. 30.

6. Kapitel. Verwendung der radioaktiven Leuchtfarben.

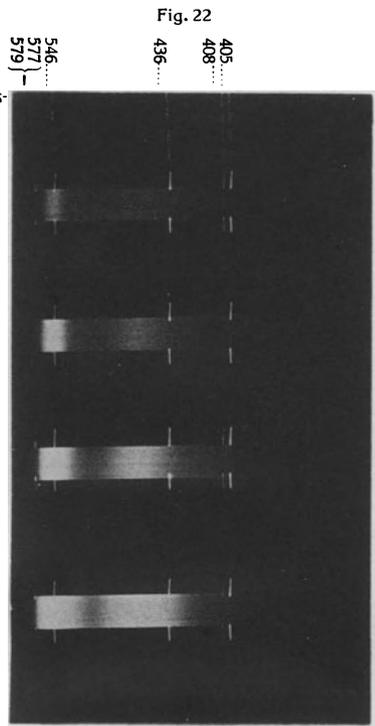
- ¹⁾ M. Arndt, Ctr.-Ztg. f. Optik u. Mech. **37**, 389, 1916.
- ²⁾ F. Bahr, E. T. Z. **40**, 299, 1919.
- ³⁾ G. Berndt, D. Opt. Wochenschr. 1915/16, S. 79.
- ⁴⁾ Braunschweig, Münch. Med. Wochenschr. 1916, S. 1400.
- ⁵⁾ F. Henrich, Chemie u. chem. Technologie rad. Stoffe, 1918.
- ⁶⁾ H. Rebenstorf, Zeitschr. f. phys. u. chem. Unterricht **32**, 24, 1919.
- ⁷⁾ K. Stargardt, Münch. Med. Wochenschr. **33**, 1918.
- ⁸⁾ M. v. Waldheim, Chem. Techn. Rezept-Taschenbuch.
- ⁹⁾ Wolff, Allgem. Vermessungs-Nachr. **28**, 329, 1916.

7. Kapitel. Statistik und Ökonomie der Leuchtfarben.

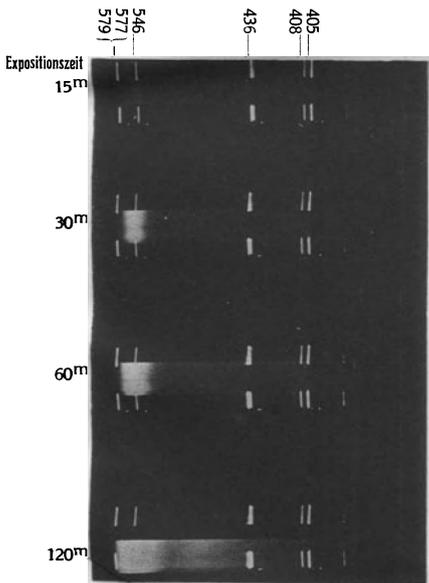
- ¹⁾ F. Bahr, Zeitschr. f. Beleuchtungswesen **22**, Heft 21/22, 1916.
 - ²⁾ W. Coblentz, ebenda **17**, 29, 1911.
 - ³⁾ K. L. Hennig, Naturw. **2**, 343, 490, 1914.
 - ⁴⁾ F. Henrich, Chemie u. chem. Technologie rad. Stoffe, 1918.
 - ⁵⁾ E. Marsden, Proc. Roy. Soc. (A) **83**, 548, 1910.
 - ⁶⁾ A. R. Meyer, Verh. d. D. Phys. Ges. **17**, 395, 1915.
 - ⁷⁾ W. Petraschek, Zeitschr. f. Bergbau und Hüttenwesen 1915.
 - ⁸⁾ B. Walter, D. Opt. Wochenschr. 1915/16, S. 537, 556.
 - ⁹⁾ Tätigkeitsber. d. Phys.-Techn. Reichsanstalt, Zeitschr. f. Instrkde. **36**, 84, 1916; **37**, 73, 1917; **38**, 62, 1918; **39**, 107, 1919.
-



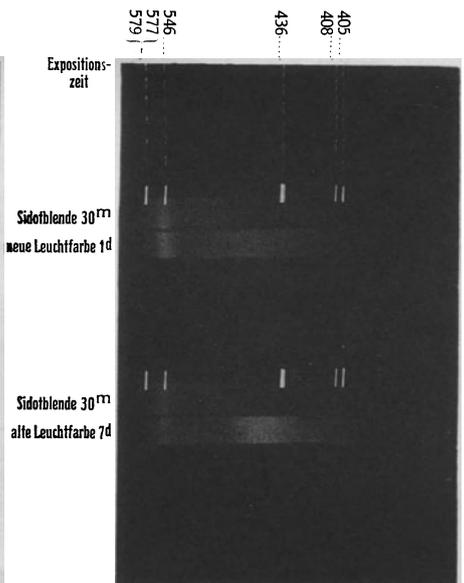
Spektrum der Glühlampe
 (zum Vergleich Quecksilberspektrum)



Spektrum einer neuen Leuchtfarbe
 (zum Vergleich Quecksilberspektrum)



Spektrum der Sidotblende
 bei Bestrahlung mit der Quarzquecksilberlampe
 (zum Vergleich Quecksilberspektrum)



Spektrum einer neuen Leuchtfarbe,
 alten Leuchtfarbe und Sidotblende
 (zum Vergleich Quecksilberspektrum)

Berichtigungen.

- Seite 2, Zeile 2 v. o. statt Cascariolo muß es heißen Casciarolo.
- „ 19, „ 20 „ „ „ $U X_2$ „ „ „ Pr Ac, $U X_2$.
- „ 21/22 v. o. muß heißen: nicht mehr in ein aktives E-Produkt übergeht, sondern das stabile Endglied bildet.
- „ 24, „ 5 v. u. statt: Aus dem $MsTh_2$ muß es heißen: Aus dem $MsTh_1$.
- „ 28, „ 17 v. o. Tab. 1 statt Ac 3,56 muß es heißen Pr Ac 3,34.
- „ 21 „ „ Tab. 1 statt 5,27 „ „ „ 6,27.
- „ 22 „ „ Tab. 1 muß es heißen:
- statt Ac C' 5,15 $\begin{cases} \text{Ac C } 5,15 \\ \text{Ac C' } 6,4. \end{cases}$
-