

Über die Phosphorescenztilgung IV

Variation der erregenden Strahlung

Von FRITZ BECKER ^{†1}

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Heidelberg

(Z. Naturforschg. 2 a, 100—108 [1947]; eingegangen am 1. September 1945)

Die gegenwärtige Untersuchung erbringt in Fortführung vorhergehender Arbeiten weitere experimentelle Beiträge zur Kenntnis des Tilgungssphänomens der Phosphorescenz. Es wird die Abhängigkeit der während der Erregung erfolgenden Phosphorescenztilgung durch Ultrarot von der Art der erregenden Strahlung (Licht verschiedener Wellenlänge, Röntgenstrahlen, α -Strahlen, Kathodenstrahlen) systematisch messend verfolgt und eine sehr erhebliche Verschiedenheit des Gleichgewichts von Erregung und Tilgung durch Ultrarot in den verschiedenen Fällen festgestellt.

Während der zuerst experimentell verfolgte, verhältnismäßig einfache Vorgang der langwelligen Tilgung des *Nachleuchtens*² einen begrenzteren Fragenkomplex betrifft, setzt das Verständnis des Zusammenwirkens der gleichzeitig erfolgenden Erregung und Tilgung eine erheblich umfassendere Erfahrung voraus. Es handelt sich hier um das dynamische Gleichgewicht zwischen Erregung und deren Vernichtung durch langwellige Einstrahlung.

Unsere bisherigen Beobachtungen bezogen sich überwiegend auf die Erregung der Phosphorescenz durch ultraviolette Licht festgehaltener spektraler Zusammensetzung und auf die gleichzeitige langwellige Tilgung durch das unzerlegte ultrarote Wellengebiet jenseits etwa 900 $\mu\mu$ ³. Es haben sich in diesem Fall übersichtliche Zusammenhänge zwischen der Größe der Tilgung und den wirksamen Lichtintensitäten gezeigt, die wir in einer vorhergehenden Arbeit^{3a} quantitativ zu fassen versucht haben.

Nachdem sich bisher mehrfach Andeutungen dafür bemerkbar gemacht haben, daß das untersuchte Strahlungsgleichgewicht erheblich von der Art der erregenden Strahlung abhängt, wurde diese Abhängigkeit nunmehr systematisch verfolgt. Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Variation der Erregungsweise erstreckt

sich auf die Erregung durch Licht verschiedener Wellenlänge einschließlich der Röntgenstrahlung und auf die Erregung durch α -Strahlen. Zum Vergleich wird noch die von anderer Seite im Institut gewonnene Kenntnis über den Fall der Erregung durch Kathodenstrahlen hinzugenommen.

Die Untersuchungsmethode ist im Prinzip die in den vorhergehenden Arbeiten benutzte. Der verwandte Phosphor wird in etwa 1 mm dicker Schicht bei Zimmertemperatur erregt und nach Herstellung seiner Strahlungskonstanz zusätzlich durch das mit dem Schott-Glas UG 6 gefilterte Licht einer Wolframbandlampe ultrarot getilgt. Seine vor und während der Tilgung sich einstellende Emission wird mittels eines Selen-Photoelements gemessen, dem im allgemeinen eine Schott'sche Filterkombination GG 5+B G 19 vorgeschaltet ist, um die messend erfaßte Strahlung des Phosphors spektral zu begrenzen und störende Streustrahlung möglichst auszuschalten. Der Einfluß des am Phosphor reflektierten, von der Belichtung herrührenden Streulichts wird durch den Ersatz des Phosphors durch einen praktisch inaktiven Stoff (wie z. B. ungeglühtes ZnS oder Magnesia) von möglichst gleicher struktureller Beschaffenheit getrennt ermittelt. Wenn dadurch auch die tatsächlich beim Phosphor vorliegenden Verhältnisse nicht streng wie-

¹ Mein am 12. April 1945 gefallener Sohn hat diese Arbeit in der zweiten Hälfte des Jahres 1943 durchgeführt und noch nahezu vollständig druckfertig gemacht. A. Becker.

² Vergl. Handb. d. Exp.-Physik 23 [1928].

³ A. Becker u. J. Schaper, Ann. Physik 42, 381 [1942]; A. Becker u. Fritz Becker, Ann. Physik. 43, 598 [1943]; A. Becker, J. Schaper u. Fritz Becker, Reichsber. Physik 1, 169 [1945].

^{3a} Noch unveröffentlicht.

derzugeben sind, so verursacht dies meist keine fühlbare Unsicherheit der gesuchten Meßwerte, da der Streueffekt in allen Fällen, in denen er im folgenden nicht besonders erwähnt wird, höchstens einige Prozente des Gesamteffekts erreicht. Wo es sich um kleine Gesamteffekte handelt, oder wo die erregenden Wellenlängen den vom Phosphor emittierten sich nähern, vermag seine ungenügende Kenntnis allerdings die Genauigkeit der Aussagen merklich zu beeinträchtigen, was ausdrücklich zu beachten ist. Die untersuchten Stoffe sind ZnS-Cu- und ZnS/CdS-Ag-Phosphore definierter Präparation.

1. Erregung durch Licht verschiedener Wellenlänge

Zur Variation der den Phosphor erregenden Lichtsorte wird sowohl die spektrale Zerlegung als die Filterung benutzt.

a) Erregung im Spektrum

Der Phosphor wird auf einem Schlitten mittels einer Schraubenführung im Spektrum eines lichtstarken großen Quarz-Spektralapparats, dessen Spalt durch eine lineare Quarz-Quecksilberlampe ersetzt ist, in Schritten von 5 mm verschoben. Durch Hinzunahme einer Hilfs-Quarzlinse wird jedes herausgeblendete Spektralgebiet so weit verbreitert, daß es die Phosphorfläche möglichst gleichförmig bestrahlt. Für jede Schlittenlage im Intervall 5—17 (cm) wird die erregte Phosphorintensität vor und während der Tilgung mehrfach gemessen und durch Abzug der in analoger Weise ermittelten Streustrahlung korrigiert. Um die Tilgung in den verschiedenen Wellenbereichen des erregenden Lichts bei gleicher erregter Intensität vergleichen zu können, ist noch die Abhängigkeit der Tilgung von der erregten Phosphorintensität zu berücksichtigen. Hierzu ist es erforderlich, für jede erregende Wellenlänge Messungen mit verschiedenen erregenden Intensitäten vorzunehmen, so daß man für jede Spektralstelle eine Tilgungskurve erhält. Zur Bestimmung dieser „Isochromaten“ wird in den Strahlengang der erregenden Lichtquelle ein rotierender Sektor eingeschaltet, dessen Öffnungsverhältnis verändert werden kann.

Für den ZnS-Cu-Phosphor L zeigt Abb. 1 die ohne (J_e) und mit Tilgung (J_e^t) erregte korrigierte Intensität als Funktion der Wellenlänge

für die beiden mit voller und halber Sektoröffnung erhältlichen erregenden Intensitäten (J_0). Die 3 Quecksilberlinien bei 313, 365 und 405 m μ treten deutlich hervor. Man sieht ferner, daß die zur gleichen Abscisse gehörigen J_e -Werte den Werten von J_0 praktisch proportional sind. Diese Feststellung stimmt mit unserer älteren Erfahrung an ZnS-Cu-Phosphoren überein⁴. Der aus

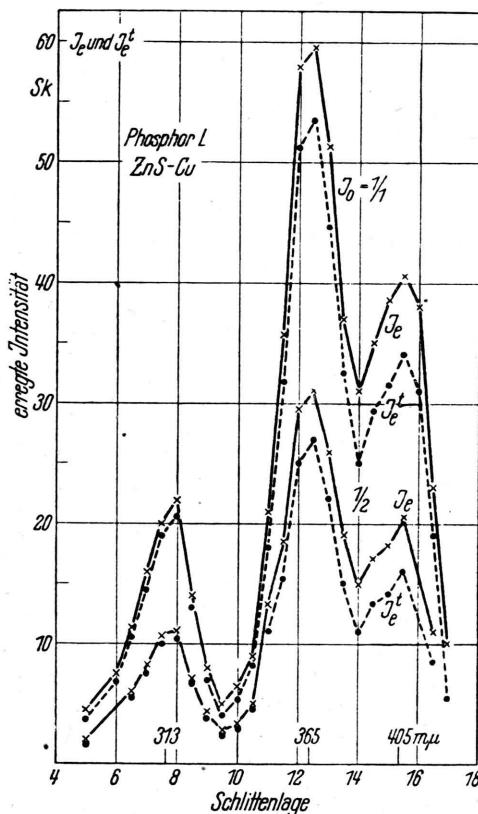


Abb. 1. Spektrale Erregung und Tilgung eines ZnS-Cu-Phosphors.

der Ordinatendifferenz der ausgezogenen und gestrichelten Linienzüge ersichtliche Tilgungswert zeigt wesentliche Größenunterschiede im Spektrum. Die Isochromaten erhält man, wenn man die zur gleichen erregenden Wellenlänge gehörigen Werte der relativen Tilgung als Funktion der ohne Tilgung erregten Intensität J_e aufträgt. Von den so erhaltenen Kurven ist ein Teil, der den

⁴ Die hiervon abweichenden Erscheinungen, welche J. H. Gisolf u. F. A. Kröger, Physica 6, 1101 [1939], an schwach kupferhaltigen ZnS-Phosphoren beobachtet haben, liegen also im gegenwärtigen Fall nicht vor.

durch die beigefügten Zahlenangaben festgelegten Schlittenlagen entspricht, in Abb. 2 verzeichnet. Ihr Verlauf entspricht dem unserer älteren Erfahrung.

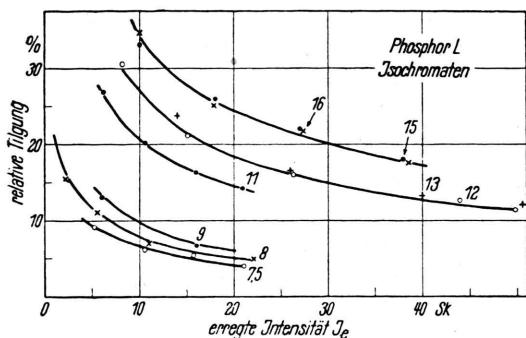


Abb. 2. Abhängigkeit der relativen Tilgung eines ZnS-Cu-Phosphors von der erregten Intensität für festgehaltene erregende Wellenbereiche (Isochromaten).

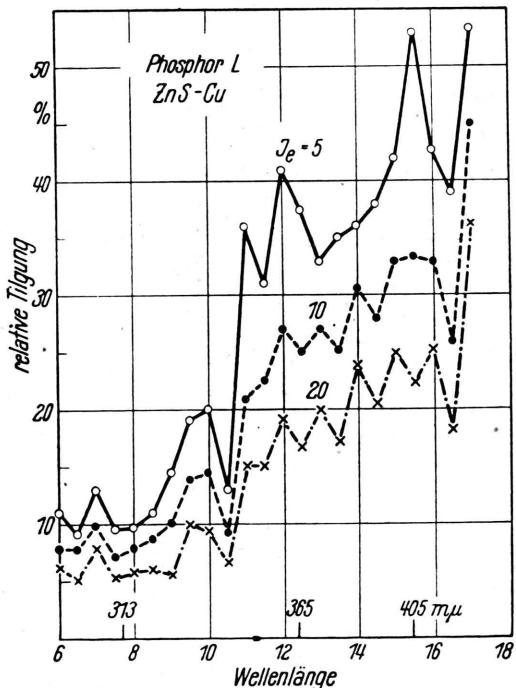


Abb. 3. Tilgungsverteilung über das erregende Spektrum (Kurven gleicher erregender Intensität) bei einem ZnS-Cu-Phosphor.

Mit Hilfe dieser Isochromaten kann man nun für einen über den ganzen Wellenbereich konstant gehaltenen J_e -Wert den Gang der relativen Tilgung gewinnen, der unmittelbar die gesuchte Wellenabhängigkeit des Tilgungseffekts darstellt. Die Abb. 3 veranschaulicht das Ergebnis für drei

herausgegriffene J_e -Werte. Die durch die lineare Verbindung der aufeinanderfolgenden Punkte sich ergebende Sprunghaftigkeit der Linienzüge hat keine physikalische Bedeutung. Als wesentliches Ergebnis ist dem Kurvenbild die Feststellung zu entnehmen, daß die langwellige Tilgung bei konstant gehaltener erregter Intensität des in relativ dicker Schicht vorliegenden Phosphors mit wachsender erregender Wellenlänge in dem hier untersuchten Spektralbereich zunimmt. Diese Zunahme erscheint besonders bemerkenswert im kürzerwelligen Bereich, während dem sprunghaften Anstieg jenseits 405 m μ , wo die Erregungsfähigkeit des Phosphors stark abfällt und andererseits das Streulicht erhebliche Werte annimmt, wohl geringere Sicherheit zuzusprechen ist. Die an sich wünschenswerte Verfolgung des Effekts bezüglich des etwaigen Zusammenhangs mit der Lage der d -Erregungsmaxima und der Emissionsbande begegnet aus gleichen Gründen großen Schwierigkeiten.

Zu weiterer Untersuchung der Wellenabhängigkeit wird noch ein *Silber-Mischphosphor ZnS₈₀/CdS₂₀-Ag (F 20)* benutzt. Die Untersuchung des Streulichts zeigt hier, daß dieses in den Bereichen der beiden Haupterregungen bei 313 und 365 m μ keine wesentliche Rolle spielt, daß es aber von etwa 380 m μ an nach längeren Wellen hin ansteigt und in der Gegend von 405 m μ Beiträge annimmt, die vom erregten Phosphor kaum noch merklich überschritten werden. Die gegenüber dem vorbeschriebenen Phosphor L geringere Erregbarkeit dieses Silber-Phosphors im langwirigen Spektralgebiet setzt daher die Sicherheit der beabsichtigten Aussagen für dieses Gebiet besonders stark herab. Auch eine andere Filterung würde hier kaum Nutzen gebracht haben.

Aus der danach korrigierten und nach Art der Abb. 1 festgelegten Verteilung der erregten Intensität und ihrer Tilgung im untersuchten Spektralbereich ergibt sich nach Auswertung der zugehörigen Isochromaten das in Abb. 4 dargestellte Bild für drei herausgewählte konstante J_e -Werte. Wenn der allgemeine Verlauf der Tilgungskurven für alle drei J_e -Werte die ersichtliche gute Übereinstimmung zeigt, so darf daraus wohl entnommen werden, daß die oben als möglich zugelassene wachsende Unsicherheit mit abnehmendem J_e das erträgliche Maß nicht überschreitet. Wie beim Cu-Phosphor zeigt sich also auch beim Ag-Phosphor ein Anwachsen der Tilgung mit zu-

nehmender erregender Wellenlänge. Allerdings wird man auch hier, und in diesem Fall mit besonderer Berechtigung, dem erheblichen Anstieg der Tilgung bei $405 \text{ m}\mu$ nicht die Sicherheit zusprechen dürfen, die man für das kürzerwellige Gebiet annehmen darf, da die relativ beträchtliche Lichtreflexion eine zweifelsfreie Korrektion der Meßwerte kaum verbürgen kann⁵. Auf diese Unsicherheit weist offenbar auch der rasche Ab-

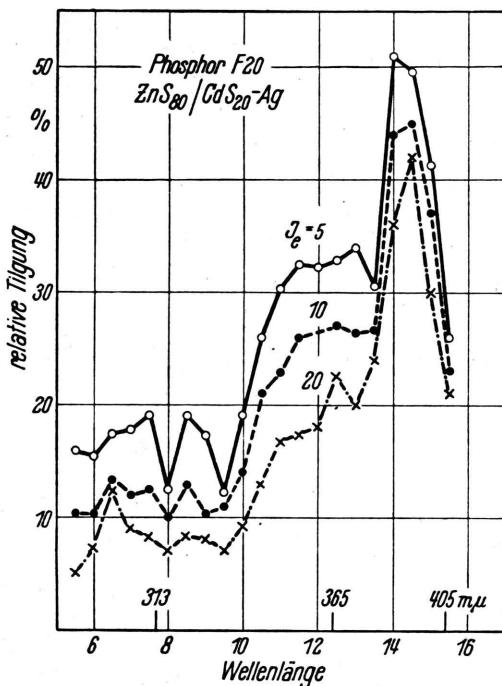


Abb. 4. Tilgungsverteilung über das erregende Spektrum (Kurven gleicher erregender Intensität) bei einem ZnS/CdS-Ag-Phosphor.

fall des Linienzugs jenseits $405 \text{ m}\mu$ hin, da nicht anzunehmen ist, daß die Zunahme der Tilgung sich gerade auf die Stelle ausgeprägter Erregung des Phosphors konzentrieren soll. Entsprechend wird man auch für die zwischen den Quecksilberlinien sich bemerkbar machenden Einschnitte in den Linienzügen die aus den dort vorhandenen geringen erregten Intensitäten folgende größere Unsicherheit der Tilgungsermittlung verantwortlich machen müssen.

⁵ Ein Anwachsen der Tilgung beim Übergang von 365 zu $435 \text{ m}\mu$ bei diesem Phosphor gibt auch Dr. F. Bandow, allerdings ohne Genauigkeitsurteil, in einem mir im September 1944 vorgelegten Bericht an. A. Becker.

b) Erregung im gefilterten Licht

Zu weiterer Prüfung der obigen Befunde wird der Phosphor L auch in dem durch verschiedene Lichtfilter ausgesonderten Licht einer Liliput-Quecksilberlampe erregt. Abb. 5 zeigt den erhaltenen Gang der relativen Tilgung mit der erregten Intensität J_e für sechs verschiedene Filter, deren ungefähre Durchlässigkeit D daneben verzeichnet ist. Der Vergleich der in den verschiedenen Wellengebieten auftretenden Effekte ergibt sich hier unmittelbar aus den zur jeweils gleichen Abscisse gehörigen Ordinatenwerten. Die Zunahme der Tilgung mit der Wellenlänge der er-

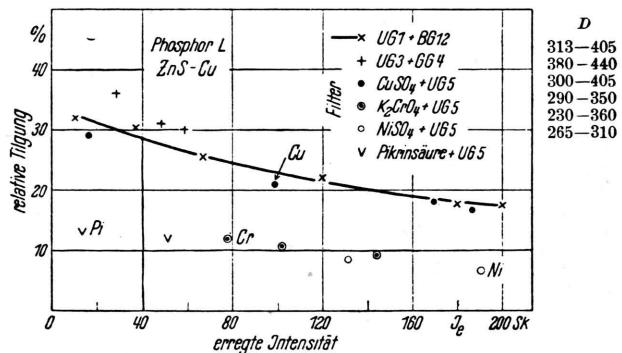


Abb. 5. Tilgung eines ZnS-Cu-Phosphors bei Variation der erregenden Lichtsorte durch Filter.

regenden Strahlen ist auch hier offensichtlich. Die Tilgung ist bei den das kürzerwellige Ultraviolett aussondernden drei letzten Filtern auffallend gering, in dem durch das 2. Filter ausgewählten relativ langwelligen Gebiet am höchsten, während sie beim 1. und 3. Filter, die nahe das gleiche Spektralgebiet begrenzen, erwartungsgemäß praktisch die gleichen Werte besitzt.

2. Erregung durch Röntgenstrahlen

Um einen unter gleichen Versuchsbedingungen unmittelbar vornehmbaren Vergleich der Tilgbarkeit der durch Licht und durch Röntgenstrahlen erregten Phosphoreszenz zu ermöglichen, wird die allgemein für filtriertes Licht benutzte Meßanordnung derart mit den erregenden Strahlenquellen kombiniert, daß die UV-Lampe und die Röntgenröhre ihren Platz vertauschen können, ohne daß eine Veränderung aller anderen geometrischen Verhältnisse, insbesondere auch der Lage der Tilgungslampe, eintritt. An Stelle des

UV-Filters wird für die Röntgenstrahlen ein dünnes Aluminiumfilter eingesetzt, um störendes Licht auszuschalten. Eine Streulichtkorrektion fällt dabei weg. Es war dies deshalb von besonderem Wert, weil die verfügbare Röntgenapparatur eine verhältnismäßig nur schwache Erregung der Phosphore zuließ. Für den durchzuführenden Vergleich ist es natürlich erforderlich, daß auch die Lichtbestrahlung die gleichen schwachen erregten Intensitäten liefert.

Die Messungen zeigen zunächst, daß in dem benutzten Wellenbereich der Röntgenstrahlung eine

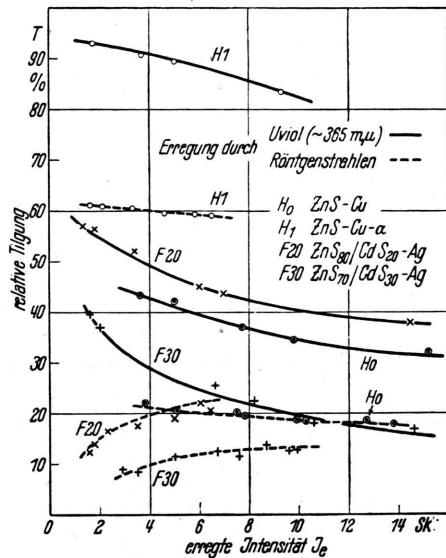


Abb. 6. Tilgung verschiedener Phosphore bei Erregung mit Licht und mit Röntgenstrahlen.

systematische Abhängigkeit der Tilgung von der Wellenlänge innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Messung nicht vorhanden ist. Die Strahlhärte wurde zwischen 20 und 50 KV variiert, wobei allerdings stets die unveränderliche Eigenstrahlung der Kupfer-Antikathode hinzukommt. Die vergleichenden Messungen können daher mit einer beliebigen Strahlhärte vorgenommen werden. Es werden meist 50 KV benutzt, um eine möglichst ausreichende Strahlintensität zu erhalten.

Das Ergebnis der vergleichenden Messungen zeigt Abb. 6 für vier stark verschiedene Phosphorpräparate, nämlich einen schwächeren und einen stark tilgbaren Cu-Phosphor und zwei Ag-Mischphosphore mit verschiedenem Cadmiumgehalt. Die Erregung durch Ultraviolett erfolgt durch das

mit UG 1 + BG 12 gefilterte Quecksilberlampenlicht, wie es auch zu einer in Abb. 5 angeführten Messung benutzt worden ist und vorherrschend durch die Linie 365 m μ repräsentiert wird. In diesem Fall ist die Tilgbarkeit der geprüften Phosphore durchweg erheblich größer als bei gleichstarker Erregung durch Röntgenstrahlen. Jedoch sind die Unterschiede nicht größer, als sie im Vorhergehenden innerhalb des ultravioletten Spektrums sich zu erkennen gaben. Ein charakteristisch verschiedenes Verhalten ist zwischen den Cu- und Ag-Phosphoren festzustellen, für die auch in unseren älteren Untersuchungen prinzipielle Verschiedenheiten gefunden worden sind. Während die relative Tilgung bei Ultravioletterregung in allen Fällen mit wachsender Erregung sinkt, trifft dies bei der Erregung durch Röntgenstrahlen nur bei den Cu-Phosphoren zu, wenn dies auch nur in abgeschwächtem Maße der Fall zu sein scheint. Bei den Ag-Phosphoren dagegen wird die auffallende Tatsache eines Anstiegs beobachtet. Dies kann beispielsweise, wie beim Phosphor F 30 ersichtlich, die Folge haben, daß die Unterschiede der Tilgbarkeit für die beiden Erregungsarten mit wachsender Erregung bis zum Verschwinden abnehmen können.

3. Erregung durch α -Strahlen

Es ist schon gelegentlich älterer Untersuchungen⁶ festgestellt worden, daß das durch α -Strahlen erregte Phosphorleuchten (Radiolumineszenz) der langwelligen Tilgung, wenn überhaupt, so doch nur in sehr geringfügigem Maße unterliegt. Im Zusammenhang mit dem in gegenwärtiger Arbeit aufgeworfenen Problem ist es wünschenswert, die Frage nach der Tilgbarkeit der Radiolumineszenz erneut zu prüfen. Der Phosphor wird zu diesem Zweck in ein kleines Flachgefäß aus Quarzglas eingefüllt und mit starker Radiumemanation beladen, die nach einigen Stunden zu einem laufenden radioaktiven Gleichgewicht führt, währenddessen der Phosphor über sein ganzes Volumen gleichmäßig durch α -Strahlen erregt wird. In der lichtdichten Meßkammer kann dann die Tilgungsfähigkeit sowohl der reinen Radiolumineszenz nach Abklingen jeder Lichterregung als auch der Summe von Radio- und Photolumineszenz bei zusätzlicher Erregung durch Licht

⁶ A. Becker u. J. Schaper, Ann. Physik 42, 319 [1942].

nach dem üblichen Verfahren ermittelt werden. Die langwellige Tilgung geschieht stets unter den Bedingungen aller zuvor besprochenen Versuche, und zur Erregung der Photoluminescenz dient das durch UG1 + BG12 gefilterte UV der Liliput-Quecksilberlampe.

Das Resultat einer über mehrere Tage nach der Emanationsbeschickung laufenden Versuchsreihe mit dem schon oben benutzten Phosphormaterial L findet sich in Abb. 7. Die *Radioluminescenz* liefert 5 Std. nach Abschluß des Präparats 17 Skalenteile, nach 21 Std. 12 und nach

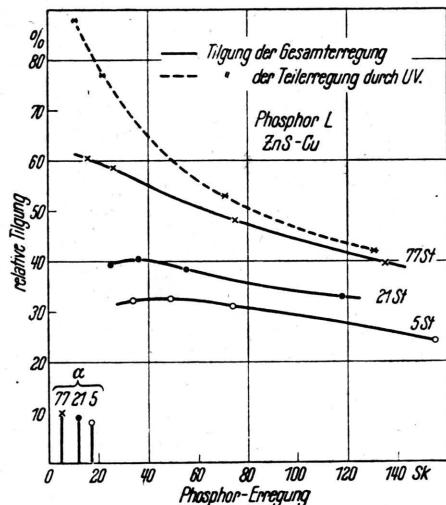


Abb. 7. Tilgung eines radioaktiv und ultraviolett erregten ZnS-Cu-Phosphors.

77 Std. noch 4,8 Skalenteile. Der Rückgang des Galvanometers bei Ultrarotbestrahlung beträgt in diesen drei Fällen 1,4, 1,1 und 0,4 Skalenteile. Er ist also zwar vorhanden, aber immer so klein, daß die geringste Lichtstörung eine beträchtliche Unsicherheit in der Größe der Tilgungsangabe mit sich bringt. Es ist auch zu erwähnen, daß die Ausgangswerte der Luminescenz nach Abstellung der UR-Bestrahlung, wenn überhaupt, so doch erst nach langer Zeit wieder erreicht werden, andererseits bisweilen auch überschritten werden können, so daß man — wie auch in der älteren Arbeit bemerkt — an geringe Veränderungen im Phosphor denken könnte, die nicht als zweifelsfreie Tilgung anzusehen wären. Vielleicht ist es auch nicht ausgeschlossen, daß der Ultrarot-Einfluß ganz oder teilweise auf eine restliche Photoluminescenz ausgeübt wird, sofern eine Erregung durch Licht noch nicht vollstän-

dig abgeklungen oder durch die Eigenstrahlung des Präparats als Eigenerregung sekundär hervorgerufen worden ist. Jedenfalls bestätigt sich die ältere Erfahrung, daß die *Radioluminescenz*, wenn überhaupt merklich, immer nur *geringfügig langwellig tilgbar* ist.

Dies geht auch anschaulich aus den Tilgmessungen hervor, welche bei zusätzlicher Erregung des Phosphors durch Licht vorgenommen werden. Bezieht man nämlich die in solchen Fällen bemerkbare Tilgung auf die *Gesamterregung* (Radio- + Photoluminescenz), so ergeben sich Werte der relativen Tilgung, wie sie für die drei Altersstufen des Präparats durch die ausgezogenen Kurven der Abb. 7 als Funktion dieser Erregung dargestellt sind. Der Verlauf dieser Kurven weicht grundsätzlich von demjenigen ab, der stets für die reine Photoluminescenz beobachtbar ist. Diese Abweichung wächst mit der Größe des Verhältnisses der Radio- zur Photoluminescenz in dem Sinne, daß die relative Tilgung um so mehr verringert erscheint, je größer der Anteil der Radioluminescenz an der Gesamterregung ist. Dies ist besonders beim jungen Präparat und bei geringer zusätzlicher Belichtung der Fall und weist darauf hin, daß am so ermittelten Tilgungseffekt die Radioluminescenz zum mindesten in weit geringerem Maße beteiligt ist als die Photoluminescenz. Bezieht man die beobachtete Tilgung nur auf letztere unter Berücksichtigung der geringen am nur α -bestrahlten Präparat gefundenen Tilgung, so erhält man einen Verlauf, wie er für das 77 Std. alte Präparat durch die gestrichelte Kurve wiedergegeben wird, die durchaus den Charakter unserer für die reine Photoluminescenz typischen Kurven besitzt. Der grundsätzliche Größenunterschied in der Tilgungsfähigkeit der beiden verschiedenen Phosphorescerzerregungen tritt auf diese Weise mit besonderer Deutlichkeit hervor.

Es sei für diese Tatsache noch ein weiterer Beleg gegeben, der das Verhalten einer mit Emanation (äquivalent 60 mg Radium/g) beschickten Phosphorprobe wiedergibt, deren Eigenschaften sich infolge der starken α -Bestrahlung so rasch ändern, daß ihre fortlaufende Messung schon im Verlauf weniger Tage das durch Abb. 8 gegebene charakteristische Bild liefert. Es wird einmal die reine Radioluminescenz J_a und ihre relative Tilgung T_a gemessen, das andere Mal zusätzlich mit konstanter Intensität ultraviolett erregt (ergibt

$J_a + J_e$) und getilgt (ergibt $T_a + T_e$). Die beiden Kurven J_a für die reine Radiolumineszenz und J_a für die durch Subtraktion des J_e von der Gesamtemission erhältliche zusätzlich erregte Photolumineszenz haben zufällig nahe gleiche Anfangswerte und sinken in ähnlicher Weise ab. Das Hinzutreten des ultraroten Tilgungslichts, das die relativen Tilgungswerte T_a und T_e liefert, bezieht sich also, was für den Vergleich wichtig ist, auf nahe gleiche Erregung. Die Kurve T_a zeigt, daß die Tilgbarkeit der Radiolumineszenz wieder sehr geringfügig und offenbar nicht wesentlich vom Zerstörungsgrad des Phosphors abhängig ist;

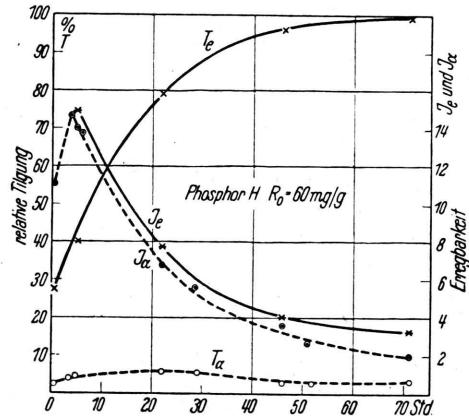


Abb. 8. Vergleich der Tilgung von Radio- und Photolumineszenz eines ZnS-Cu-Phosphors.

dem geringen anfänglichen Kurvenanstieg ist wohl keine Bedeutung zuzuschreiben. Ein grundsätzlich anderes Verhalten zeigt die Kurve T_e . Sie gibt die lediglich die UV-Erregung betreffende relative Tilgung wieder, deren starker Anstieg mit dem Alter des Phosphors — in drei Tagen auf nahe 100% — für die Photolumineszenz charakteristisch ist.

4. Erregung durch Kathodenstrahlen⁷

Der Vollständigkeit des Überblicks über die verschiedenen Erregungsarten halber sei hier kurz erwähnt, daß die langwellige Tilgung der durch Kathodenstrahlen (von 800 bis 30 000 Volt) erregten Phosphoreszenz während der Erregung beträchtlich viel geringer ist als diejenige der Photolumineszenz bei schätzungsweise gleicher erregter Intensität und bei den langsamen Strahlen

⁷ Ich füge hier diese Angaben ein nach einem mir im Sept. 1944 von Hrn. Dr. F. B a n d o w vorgelegten kurzen Bericht über diese Erscheinung, die er auf meine Anregung untersucht hat. A. Becker.

len Größenordnungsmäßig nur etwa 10 % der letzteren, bei den schnelleren Strahlen kaum nachweisbare Werte erreichen solle, während die Tilgbarkeit des Nachleuchtens in den Vergleichsfällen keine wesentlichen Unterschiede zu zeigen scheint.

5. Zur Deutung der Meßergebnisse

Nach der bisherigen Erfahrung ist anzunehmen, daß die Tilgbarkeit der *Lichtsumme* des langdauernden Nachleuchtens der Phosphore von der Art der vorausgegangenen Erregung praktisch unabhängig ist, sofern es sich um die gleichen Phosphoreszenzbanden handelt. Es ist dies auch kaum anders zu erwarten, da die physikalischen Verhältnisse im erregten Zustand des Phosphors durch seinen Zentrenaufbau und einige Zeit nach der Erregung durch eine gewisse Einheitlichkeit der maßgebenden Zentrengröße bestimmt sein werden. Die großen Unterschiede der Tilgbarkeit des *während der Erregung* vorhandenen *Gesamtleuchtens*, welche im Vorstehenden nachgewiesen sind, deuten darauf hin, daß hier entweder wesentliche, für das Gleichgewicht von Erregung und Tilgung maßgebende Verschiedenheiten im Ablauf der diese Erscheinungen verursachenden physikalischen Mechanismen vorliegen, oder daß mit der Erregung zusammenhängende Nebenursachen eine erhebliche Rolle spielen. Da Vermutungen über letztere am nächsten liegen, ist auf sie zuerst einzugehen.

a) Es ist mit der Möglichkeit zu rechnen, daß die spektrale Intensitätsverteilung der Phosphoremission von der Art der Erregung abhängt, und daß die Tilgung die einzelnen Spektralstellen in verschiedenem Maße erfaßt. Dies kann unsere Befunde aber nicht erklären. Die durch UV-Licht erregte Emission des ZnS-Cu-Phosphors erstreckt sich im wesentlichen kontinuierlich auf das Spektralgebiet zwischen 440 und 560 m μ mit dem Maximum bei 525 m μ , und beim ZnS₈₀/CdS₂₀-Ag-Phosphor F 20 liegt ein kontinuierliches Spektrum zwischen etwa 420 und 560 m μ mit einem Maximum bei 490 m μ vor⁸. Wir haben nun

⁸ Vergl. die photographische Wiedergabe dieser Spektren durch Abb. 5 der Arbeit A. Becker, J. Schaper u. Fritz Becker, Reichsber. Physik 1, 169 [1945], wo der Phosphor HZ mit dem jetzigen L übereinstimmt. In den dortigen Abb. 5 sind aber die Bezeichnungen 2 u. 1a bzw. F20 u. HZ miteinander zu vertauschen; auch H. Kling, Dipl.-Arbeit Heidelberg, Jan. 1945.

durch verschiedene Ausfilterung des Phosphoreszenzlichts für den ZnS-Cu-Phosphor unmittelbar nachgewiesen⁹, daß die meßbaren Tilgwerte von diesen Filterungen praktisch unbeeinflußt bleiben. Es ist überdies bekannt¹⁰ und auch durch eigene Spektralaufnahmen erhärtet, daß das Spektrum des durch α -Strahlen erregten Lichts mit dem durch Ultraviolett erregten identisch ist, daß bei Erregung mit Röntgenstrahlen keine wesentlich neuen Erscheinungen auftreten¹¹ und daß der bei Erregung durch Kathodenstrahlen begünstigte „u“-Prozeß¹² die der Tilgbarkeit besonders zugänglichen Zentren kurzer Dauer hervortreten läßt, so daß in diesem Fall der Erregung im Gegensatz zur Beobachtung gerade erhöhte Tilgbarkeit hätte erwartet werden müssen. Ob die Erregung vorwiegend die u- oder die d-Zentren erfaßt, ist für die Tilgbarkeit offenbar überhaupt nicht sehr wesentlich. Denn es zeigt sich bei dem rasch abklingenden Silberphosphor stets, selbst bei Erregung durch Kathodenstrahlen, eine ausgesprochen hohe Tilgbarkeit, während sie bei den Kupfer-Phosphoren im letzteren Fall immer gering ist.

b) Wenn wir bei allen im Vorstehenden durchgeführten Vergleichen stets Wert darauf gelegt haben, die Tilgbarkeit der in jedem Falle gleichen vom Phosphor emittierten erregten Intensität zuzuordnen, so bleibt zu beachten, daß es sich dann doch nicht um die gleiche räumliche Verteilung der Erregung über die bestrahlte Schicht handelt. Im Falle der Erregung durch Ultraviolett werden die kürzeren Wellen stärker absorbiert werden als die längeren, und es wird daher bei gleicher Gesamtintensität die räumliche Erregungsdichte bei den ersten größer und die relative Tilgbarkeit infolgedessen kleiner sein, wie dies tatsächlich beobachtet wird. Daß hierin aber die wesentliche Ursache für die festgestellte Wellenlängenabhängigkeit der Tilgbarkeit gefunden sei, ist nicht anzunehmen. Denn dazu sind die beobachteten Unterschiede zweifellos viel zu groß, und die Erregung durch Röntgenstrahlen hat, abgesehen von anderem, keinen nennenswerten Einfluß der Wellenlänge erkennen lassen. Andererseits ist die Eindringtiefe von Licht und langsamem Katho-

denstrahlen so sehr verschieden (ca. 0,06 mm für Licht und ca. 0,006 mm für Strahlen von $\frac{1}{3}$ Lichtgeschwindigkeit), daß größere Unterschiede der Tilgbarkeit in beiden Fällen beobachtet werden müßten; auch wäre bei den schnelleren Kathodenstrahlen eine größere Tilgung als bei den langsamem zu fordern, während Hr. B a n d o w das Gegenteil angibt. Noch weniger vereinbar mit dem obigen Deutungsversuch sind die Befunde bei Erregung durch die α -Strahlen der den Phosphor homogen durchdringenden Ra-Emanation. Die Emission des Phosphorlichts ist hier gleichmäßig auf eine besonders tiefe Schicht verteilt, so daß der entsprechend geringen Erregungsdichte im starken Gegensatz zur Beobachtung eine große Tilgbarkeit zukommen müßte.

c) Es muß vielleicht beachtet werden, daß für die Wirksamkeit der tilgenden Strahlung neben der durchschnittlichen Erregungsdichte die spezielle örtliche Zentrendichte maßgebend ist. Letztere ist offenbar bei der Erregung durch α -Strahlen besonders groß (ebenso wie bei den Trägerkolonnen im durchstrahlten Gas), geringer im Falle der durch Sekundärstrahlemission wirkenden Kathodenstrahlen und noch geringer bei der durch lichtelektrische Wirkung verursachten Erregung durch Röntgenstrahlen und durch Licht. Ließe man wachsende Überdeckung der tilgbaren Querschnitte mit zunehmender Zentrendichte zu, so würde steigende relative Tilgung etwa in der hier genannten Reihenfolge der verschiedenen Erregungsarten zu folgern sein, wie dies in einiger Näherung tatsächlich der Fall ist. Die bei UV-Erregung gemessenen relativ erheblichen Unterschiede wären aber auf diese Weise kaum verständlich.

d) Bei der UV-Erregung könnte man die beobachtete Abnahme der *langwelligen* Tilgung nach kürzeren Wellen hin mit der nach kürzeren Wellen erfolgenden Zunahme der *kurzwelligen* Tilgung¹³ in Zusammenhang zu bringen versuchen. Dem steht aber der mögliche Einwand entgegen, daß durch die Bezugnahme unserer die langwellige Tilgung betreffenden Aussagen auf gleiche erregte Intensität der Einfluß der kurzwelligen Tilgung eliminiert zu sein scheint; Erwägungen solcher Art würden auch im Falle der

⁹ A. Becker u. Fritz Becker, Über die Phosphoreszenztilgung III. 26. Juli 1945. Noch unveröffentlicht.

¹⁰ N. Riehl, Physikal. u. techn. Anwendungen der Luminescenz, S. 134 [1941].

¹¹ R. Tomaszek, Ann. Physik 65, 202 [1921].

¹² Vergl. Handb. d. Exp.-Physik 23, 838 [1928]; R. Stadler, Ann. Physik 80, 741 [1926].

¹³ Vergl. Handb. d. Exp.-Physik 23, 784 [1928].

mit geringer langwelliger Tilgbarkeit verbundenen Erregung durch Kathodenstrahlen naheliegen.

e) Zu den Nebenvorgängen, welche jeder Deutungsversuch der Erscheinungen wird mit berücksichtigen müssen, gehört bei der Photolumineszenz die Veränderung der erregenden Ab-

¹⁴ Handb. d. Exp.-Physik, S. 692 [1928]; A. Hoch, Ann. Physik **38**, 486 [1940].

sorption¹⁴ durch die Tilgung, deren gesonderte Messung noch aussteht und daher anzustreben ist. Wie weit bei der Radiolumineszenz oder der Elektronenanregung die im Grundmaterial allgemein erzeugte Leitfähigkeit¹⁵ eine Rolle spielt, entzieht sich ebenfalls unserer Kenntnis.

¹⁵ A. Becker, Ann. Physik **12**, 124 [1903]; **13**, 394 [1904]; R. Lappé, Ann. Physik **39**, 604 [1941].

Der geometrische Ort für die mittlere Geschwindigkeit bei turbulenter Strömung in glatten und rauen Röhren

Von WILHELM AICHELEN*

(Z. Naturforschg. **2a**, 108—110 [1947]; eingegangen am 21. Dezember 1946)

Es wird gezeigt, daß bei ausgebildeter turbulenter Strömung im glatten und rauen Rohr beim Radius $r = 0,762 r_0$ bei allen Reynoldschen Zahlen die mittlere Geschwindigkeit herrscht (r_0 = Rohrradius). Ein auf dieser Tatsache begründetes neues Mengenmeßgerät wird vorgeschlagen.

Die turbulente Strömung in glatten Röhren spielt in der Technik eine bedeutende Rolle. Sie ist deshalb der Gegenstand zahlreicher ausführlicher Untersuchungen gewesen, die u. a. von Stanton¹, Pannell, Bazin, Schiller² und Herrmann³ durchgeführt wurden. Die letzten und genauesten Messungen auf diesem Gebiet stammen wohl von Nikuradse⁴, der seine Versuche mit Wasser und Röhren verschiedenster Durchmesser durchführte und sie bis zu den höchsten Reynoldschen Zahlen ausgedehnt hat. Alle Experimentatoren haben neben dem Druckabfall auch eingehend die Geschwindigkeitsverteilung untersucht und das Verhältnis der mittleren Geschwindigkeit zur maximalen Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Reynoldschen Zahl dargestellt. Jedoch ist nach unserem Wissen der Frage noch keine Beachtung geschenkt worden, bei welchem Radiusverhältnis die mittlere Geschwindigkeit auftritt, und ob sich dieses

Radiusverhältnis in Abhängigkeit von der Reynoldschen Zahl gesetzmäßig erfassen läßt. Einen Beitrag zu dieser Frage soll folgende Arbeit leisten.

Versuche mit Luft

Die Versuche wurden in einem kreisrunden, glatten Rohr mit Luft durchgeführt. Die verschiedenen Luftgeschwindigkeiten wurden durch Regelung der Drehzahl eines Hochdruckventilators eingestellt. An das Druckrohr des Ventilators wurde ein Behälter angeschlossen, dessen Deckelfläche aus einer Gummimembrane bestand. Dieser Ausgleichsbehälter wurde mit dem Meßrohr durch einen Gummiflansch verbunden, so daß die durch den Ventilator verursachten Erschütterungen nicht auf die Meßstelle übertragen werden konnten. Zur Erzielung einer gut ausgeprägten turbulenten Strömung im Meßquerschnitt wurde als Anlaufstrecke ein 6450 mm langes Eisenrohr von 82 mm Innendurchmesser gewählt. Der Einlauf in das Eisenrohr wurde scharfkantig ausgeführt. Um einen möglichst gleichmäßigen Übergang in das eigentliche

* Jetzt Neunkirchen (Saar), Wellesweilerstr. 78. Die Untersuchung wurde im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Danzig ausgeführt.

¹ T. E. Stanton, The mechanicle Viscosity of Fluids. Proc. Roy. Soc. [London] Ser. A, S. 366 [1911].

² Schiller, Rohrwiderstand bei hohen Reynoldschen Zahlen. Vorträge aus dem Gebiet der Aerodynamik und verwandter Gebiete, Aachen [1929]. Herausgeg. von A. Gilles, L. Hopf u. Th. v. Kármán, Berlin 1930.

³ R. Herrmann, Experimentelle Untersuchung zum Widerstandsgesetz des Kreisrohres bei hohen Reynoldschen Zahlen und großen Anlaufstrecken. Diss. Akademische Verlagsgesellschaft m.b.H., Leipzig 1930.

⁴ J. Nikuradse, Gesetzmöglichkeiten der turbulenten Strömungen in glatten Röhren, Forschungshefte 356 [1932]; Widerstandsgesetz und Geschwindigkeitsverteilung von turbulenten Wasserströmungen in glatten und rauen Röhren, Verh. 3. Intern. Kongr. f. techn. Mech., S. 239. Strömungsgesetze in rauen Röhren, Forschungshefte 361 [1933].