

## 5. *Über die aktinodielektrische Wirkung; von Ferdinand Schmidt.*

(Aus dem Radiologischen Institut der Universität Heidelberg.)

[Auszug des 2. Teiles der Heidelberger Dissertation vom 23. Juli 1913.]

### Einleitung.

Als die Herren Lenard und Sem Saeland<sup>1)</sup> die lichtelektrische Wirkung bei den Erdalkaliphosphoren untersuchten, fanden sie noch eine zweite elektrische Wirkung des Lichtes auf Phosphore, die wesentlich verschieden von der lichtelektrischen Wirkung war. Sie nannten diese aktinodielektrische Wirkung. Sie zeigte sich nach den Untersuchungen der beiden genannten Herren in folgenden Erscheinungen: Wurde der benutzte Phosphor — es war ein CaBi-Phosphor<sup>2)</sup> — in ein elektrisches Feld gebracht und mit weißem Lichte bestrahlt, so trat eine kurz dauernde elektrische Verschiebung im Phosphor auf, die stets im Sinne der angelegten Spannung gerichtet war. Besonders rotes Licht zeigte diese Wirkung sehr stark, während sie bei violettem Licht ganz fehlte. Diese Erscheinung konnte jedoch in der gleichen Richtung durch eine weitere Belichtung nicht hervorgerufen werden, außer wenn der Phosphor durch längeres Warten oder durch Erhitzen und wieder kalt werden lassen regeneriert worden war. Wurde jedoch abwechselnd positive und negative Spannung angelegt, so wiederholte sich die Erscheinung jedesmal mit der gleichen Stärke in der betreffenden Richtung. Auch in Luft von Atmosphärendruck trat diese Erscheinung in gleicher Weise wie im Vakuum auf. Aus den genannten Beobachtungen zogen die Herren Lenard und S. Saeland den Schluß, daß diese Wirkung auf eine dielektrische Verschiebung mit Rückstands-

1) P. Lenard u. Sem Saeland: Ann. d. Phys. 28. p. 476 ff. 1909.

2) Über die Zusammensetzung dieses Phosphors vgl. P. Lenard und V. Klatt, Ann. d. Phys. 15. 1904. p. 659 und in Tab. II, Nr. 8.

bildung, bzw. auf ein kurzdauerndes elektrisches Leitvermögen im Phosphor während der Belichtung zurückzuführen sei. Denn da die Wirkung vorzugsweise vom roten Licht hervorgerufen wurde, welches bekanntlich den Phosphor in denselben Zustand versetzt wie eine Erhitzung, die ihrerseits ein vergrößertes elektrisches Leitvermögen des Phosphors zur Folge hat, so lag der Analogieschluß nahe, daß auch die rote Belichtung ein Hinzukommen in den Phosphor eingebetteter elektrisch leitender Teilchen mit sich bringt. Dieses entspricht in der Tat einer Zunahme der dielektrischen bzw. rückstandsbildenden Eigenschaften des Phosphors.

Eine eingehendere Untersuchung über den aktinodielektrischen Effekt ist von Öder<sup>1)</sup> ausgeführt worden. Öder benutzte eine für die Zwecke der aktinodielektrischen Wirkung geeignetere Versuchsanordnung, als die Herren Lenard und S. Saeland. Er konnte in seinen Versuchen, die in Luft von Atmosphärendruck angestellt wurden, im wesentlichen die Resultate der Herren Lenard und S. Saeland bestätigen und zwar benutzte er zu seinen Messungen denselben Phosphor, wie die oben genannten Herren. Öder untersuchte nun den Effekt bei längerer Belichtung und fand ein schnelles Ansteigen des Effektes im Anfange der Belichtung, später ein langsames Ansteigen. Selbst nach einer Stunde konnte noch kein Endwert des Effektes konstatiert werden. Auch stieg der Effekt mit wachsender Intensität der Bestrahlung nicht proportional an. Endlich konnte auch die Abhängigkeit des Effektes von der Farbe des Lichtes eingehender untersucht werden. Der Effekt besaß bei gleicher Intensität der Bestrahlung ein Maximum im Gelb, ein Minimum im Grün und zeigte gegen das Ultraviolett ein starkes Ansteigen.

Ähnliche Effekte sind auch bei anderen Körpern als den Phosphoren bekannt. Zum Teil im Anschluß an die Arbeit der Herren Lenard und Saeland wiesen die Herren Goldmann und Kalandyk<sup>2)</sup> in einwandfreier Weise und durch eingehende, reine Versuche an dünnen, ganz durchstrahlten Schichten eine starke Leitfähigkeitserhöhung an Schellack und Schwefel bei

---

1) C. Ramsauer u. W. Haußer, *Ann. d. Phys.* **34**, p. 445ff. 1911.

2) A. Goldmann u. S. Kalandyk, *Ann. d. Phys.* **36**, p. 589. 1911.

Bestrahlung mit ultraviolettem Licht nach, und zwar waren die Erscheinungen fast genau von derselben Art, wie sie die aktinodielektrische Wirkung an Phosphoren zeigte. In der Tat war die Leitfähigkeitserhöhung durch Belichtung vom Beispiel des Selens<sup>1)</sup> her schon lange bekannt. Im Anschluß an die Untersuchungen am Selen hatte Bidwell<sup>2)</sup> auch das Schwefelsilber untersucht, und es gelang ihm bei diesem Körper zum erstenmal ein zweites Beispiel der Widerstandsverminderung unter dem Einfluß von Licht zu finden. Die Herren Charitonowsky<sup>3)</sup> u. Monckmann<sup>4)</sup> wiesen die gleiche Wirkung auch bei Schwefel nach.<sup>5)</sup> Hr. Joffé<sup>6)</sup> konnte eine Leitfähigkeitserhöhung des Quarzes bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht nachweisen. Auch für Antimonit<sup>7)</sup> sind Änderungen des elektrischen Leitvermögens bei Bestrahlung gefunden worden.<sup>8)</sup>

1) Vgl. hierzu Chr. Ries, Die elektrischen Eigenschaften und die Bedeutung des Selens für die Elektrotechnik. Harrwitz, Berlin-Nikolaesee, 1908. Auch möchte ich auf die Zusammenstellung der Arbeiten über Leitfähigkeitserzeugung durch Licht hinweisen, welche von Hrn. Chr. Ries in „Das Licht in seinen elektrischen und magnetischen Wirkungen“, Leipzig 1909, p. 208—237 gegeben wurde.

2) S. Bidwell, Phil. Mag. 20. p. 178 u. 322. 1885.

3) P. Charitonowsky, Journ. d. russ. phys. Ges. 18. p. 53. 1886.

4) J. Monckmann, Proc. Roy. Soc. London 46. p. 136. 1889.

5) Vgl. auch W. Bates, Electrician 63. p. 907. 1909.

6) A. Joffé, Ann. d. Phys. 20. p. 964. 1906.

7) F. M. Jäger, Zeitschr. f. Kristall. 44. p. 45. 1907.

8) Die *ersten* einwandfrei festgestellten Fälle von Leitvermögen durch strahlende Energie *überhaupt* (anderer Art als Belichtung) sind bei Flüssigkeiten von P. Curie (C. R. 134. p. 420. 1902, Paraffinöl mit Röntgenstrahlen) und bei festen Schichten (unter dem Einfluß von Radiumstrahlen) von Hrn. A. Becker (Ann. 12. p. 124. 1903) beschrieben worden. Hr. Becker untersuchte Schellack-, Paraffin- und Glimmerschichten, wobei, wie hier und in einer späteren Arbeit gezeigt wurde (A. Becker, Ann. 13. p. 394. 1904), die  $\beta$ -(Kathoden-)Strahlen die meiste Wirkung hervorbringen. In der letzten Arbeit ist auch bereits auseinandergesetzt und näher untersucht, wie die beobachtete Elektrometerwirkung aus dielektrischer Verschiebung, Leitung der ganzen Schicht, Leitung eines Teiles der Schicht und — bei Kathodenstrahlen — außerdem Aufladung der Schicht sich zusammensetzt. Dieselbe Betrachtung wurde kürzlich (Ann. 41. p. 449. 1913) von Hrn. W. C. Röntgen von neuem vorgebracht. Nach der Untersuchung des Hrn. Becker folgten ähnliche Arbeiten der Herren H. Becquerel (C. R. 136. p. 1173. 1903), A. Joffé (Ann. d. Phys. 20. p. 964. 1906), G. Jaffé (Ann. d. Phys. 25. p. 280. 1908) und G. Szivessy u. K. Schäfer (Ann. d. Phys. 35. p. 511. 1911).

Faßt man daher als „Aktinodielektrische Wirkung“ ganz allgemein die Veränderung der elektrischen Eigenschaften eines Dielektrikums durch Bestrahlung ins Auge, so kann man sagen, daß diese Wirkung bereits bei einer größeren Anzahl von Dielektrika (Isolatoren), wie es auch die Phosphore sind, studiert ist und daß sie bei mehreren derselben (Schwefel, Schellack, Quarz, Paraffinöl, Paraffin, Glimmer) ganz oder teilweise als Entstehung von Leitvermögen durch die Bestrahlung nachgewiesen ist. Bei den Phosphoren selbst ist es noch unentschieden, ob die Wirkung eine Verschiebung der Elektrizitäten in jedem einzelnen Molekül des Phosphors im elektrischen Felde sei oder aber ein Leitvermögen im Phosphor. Der ersteren Ansicht schließt sich Öder<sup>1)</sup> an. Bei der zweiten Möglichkeit, der Erzeugung eines Leitvermögens im Phosphor, kann man wieder zwei Fälle unterscheiden; es könnte sich um freie Elektronen handeln (metallisches Leitvermögen<sup>2)</sup>) oder aber um materielle Ionenwanderung im Phosphor (elektrolytische Leitung), wie die Herren Lenard und Saeland vermuteten.

Die vorliegende Untersuchung soll in diesen Fragen eine Entscheidung treffen.

#### Versuchsordnung.

Die Versuchsordnung, die zur Untersuchung des aktinodielektrischen Effektes verwendet wurde, war ähnlich derjenigen Öders. Auf einer Messingplatte *A* ruhte der Phosphor *P* (vgl. Fig. 1). Diese Platte steht in fester Verbindung mit dem metallischen Gehäuse *B*, das mit einer Hochspannungsbatterie verbunden werden kann. Den Phosphor bedeckt ein mit einem Bleiring beschwertes engmaschiges Drahtnetz, oder

1) C. Ramsauer u. W. Haüßer, l. c. p. 449 u. Fig. 4.

2) Hr. Chr. Ries (Ann. d. Phys. 39. p. 721. 1912) schließt aus dem Zusammenhang zwischen „Spannungseffekt“ und Leitfähigkeitsänderung bei Bestrahlung an mehreren von den oben genannten Körpern, daß ebendiese Leitfähigkeitserhöhung ein Vorgang elektronischer Natur sei; jedoch scheint dieser Schluß für die hier untersuchten Phosphore nicht zu gelten, da, wie hier gezeigt wird, die Vorgänge im Phosphor bei Bestrahlung mit Licht sehr viel ähnliches mit elektrolytischer Ionenwanderung haben.

in den späteren Versuchen eine durchsichtige versilberte Glas-<sup>1)</sup> oder Quarzplatte. Beide können durch einen seitlichen Fortsatz am Gehäuse hindurch mit einem Einfadenelektrometer nach Elster und Geitel verbunden werden. Ein zweites Metallrohr, seitlich am Gehäuse, dient zur Aufnahme eines Thermometers bei den Versuchen in der Kälte. Die seitlichen Ansatzröhren gehen schief nach oben, um unten genügend Platz zu lassen, damit man das Gefäß in eine Kältemischung tauchen kann. Der Deckel des Gehäuses ist fest mit dem Gehäuse verbunden, besitzt in der Mitte ein kreisrundes Loch von 2,7 cm Durchmesser und ist auf seiner Oberfläche eben geschliffen. Auf dieser geschliffenen Oberfläche sitzt eine Messingplatte fest auf, welche eine kreisrunde Öffnung von ca. 5 cm Durchmesser hat. Diese ist durch eine planparallele Quarzplatte verschlossen. Darüber sitzt mit einem Zwischenstück aus Holz von 2 cm Dicke eine zweite ebensolche Messingplatte mit Quarzplatte. Diese ganze Kombination hat den

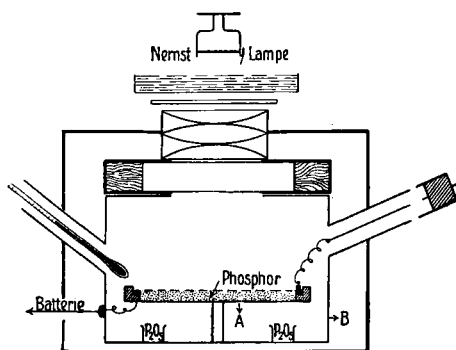


Fig. 1.

Zweck, bei den Versuchen in der Kälte ein Beschlagen der unmittelbar über der Apparatur befindlichen Quarzplatte mit Wasserdampf zu verhindern. Zum Überfluß ist an der oberen Messingplatte noch ein starker Kupferdraht angelötet, der durch eine daruntergestellte Bunsenflamme erhitzt werden kann und es so unmöglich macht, daß sich auch die obere Quarzplatte bei länger dauernden Versuchen in der Kälte be-

1) Die Silberschicht wurde nach einem Verfahren hergestellt, wie es F. Kohlrausch in seinem Leitfaden der praktischen Physik, 1910, p. 36 angibt. Um zu verhindern, daß das Silber der Platte in Reaktion tritt mit dem Schwefel des Phosphors, wurde die dünne Silberschicht befeuchtet und mit Schwefelwasserstoff bis zur vollständigen Umsetzung in Schwefelsilber behandelt.

schlagen könnte. Über dieser Quarzplattenkombination befindet sich ein Kondensator aus Glas oder Quarz, der das Licht auf den Phosphor konzentriert. Als Lichtquelle wird eine lineare Nernstlampe benutzt, deren intensive ultrarote Strahlung durch eine Wasserschicht von 1 cm Dicke und durch eine 1 cm dicke Schicht von 20proz.  $\text{CuSO}_4$ -Lösung weggenommen ist. Ein vor der Nernstlampe eingeschalteter Regulierwiderstand und Amperemeter ermöglichen es, die Lampe mit konstanter Stromstärke brennen zu lassen. Für die Versuche im Ultraviolett wird statt der Nernstlampe eine Quecksilberamalgalampe benutzt, deren Licht durch einen Prismensatz spektral zerlegt und auf den Phosphor geworfen werden kann. Bei der Untersuchung im Ultravioletten fallen natürlich alle Glasteile der Apparatur weg und werden durch Quarz ersetzt. Unmittelbar unter der Lampe befindet sich ein Blechschieber zum raschen Belichten und Verdunkeln. Um die ganze Apparatur ist zum Schutze vor elektrostatischen Störungen ein geerdeter Blechkasten angebracht, der gleichzeitig die gesamte Apparatur lichtdicht abschließt.

#### Versuche an Schichten von 0,5 mm Dicke.<sup>1)</sup>

Bevor der Phosphor in das Beobachtungsgefäß eingeführt wurde, wurde er zuerst durch verschiedene Methoden zur Isolation gebracht. Die eine Methode bestand, wie schon von Öder angewandt, in einer Erhitzung des Phosphors in einem schwer schmelzbaren Glase, durch das durch  $\text{P}_2\text{O}_5$  getrocknete Luft geleitet wurde. Eine zweite Methode bestand darin, daß der Phosphor in einem elektrischen Ofen längere Zeit auf etwa  $500^\circ \text{C}$ . gehalten wurde. Außerdem waren in der Apparatur kleine Gefäße mit Phosphorperoxyd zur Trocknung angebracht. Der Phosphor wurde sodann in einer Schichtdicke von 0,5 mm auf die untere Kondensatorplatte aufgestreut.

Legte man nun an die untere Platte etwa  $\pm 50$  Volt, was einem Feld im Kondensator von 1000 Volt/cm entsprach, so zeigte sich, daß der Phosphor im Dunkeln ein Leitvermögen besaß. Der Strom wuchs mit erhöhtem Felde nahezu grad-

---

1) Eine ausführlichere Mitteilung über diese Versuche findet sich bei: F. Schmidt, Diss. Heidelberg 1913. p. 18.

linig. Natürlich war er mit jeder Phosphorprobe verschieden. Ließ man den Phosphor längere Zeit unter einem bestimmten Felde, die obere Platte geerdet, so zeigte sich, wenn man das Netz mit dem Elektrometer verband, kein Ausschlag. Nur bei Umkehr der Feldrichtung konnte man denselben Ausschlag wie vorher erhalten. Dasselbe konnte man erreichen durch eine Erschütterung des Phosphors. Erdete man nun die obere und untere Kondensatorplatte eine kurze Zeit und verband darauf die obere Kondensatorplatte wieder mit dem Elektrometer, so zeigte dieses einen Ausschlag und zwar von entgegengesetztem Vorzeichen, wie der vorhergehende. Es sind dies die typischen Rückstandserscheinungen, die alle Dielektrika besitzen. Auch zeigten die hier untersuchten Phosphorproben eine Abnahme der Leitfähigkeit bei dauerndem Stromdurchgang.<sup>1)</sup>

Auch bei Temperaturerniedrigung trat eine beträchtliche Abnahme des Leitvermögens ein. Bei einem Temperaturunterschied von ungefähr 60° C. sank die Leitfähigkeit und damit auch die Rückstandsbildung auf  $\frac{1}{6}$  ihres früheren Wertes.

Diese bereits ohne Licht vorhandene Leitfähigkeit der Phosphore kann natürlich die aktinodielektrische Wirkung komplizieren oder gar verdecken. Es wurde deshalb die Eigenschaft der Phosphore, bei dauernder Stromwirkung und bei Temperaturerniedrigung abnehmende Leitfähigkeit zu zeigen, dazu benutzt, die Leitfähigkeit auf ein Minimum zu reduzieren. Bei den Versuchen mit weißem Licht wurde größtenteils das erstere Verfahren angewandt, bei den Versuchen mit spektral zerlegtem Licht teils das erstere, teils das zweite oder beide zusammen. Bei den Versuchen mit weißem Licht wurde eine lineare Nernstlampe benutzt. Die Nernstlampe brannte dauernd mit einer Stromstärke von 0,5 Amp. Die Messung wurde folgendermaßen ausgeführt. Der Phosphor wurde in das Beobachtungsgefäß gebracht, ein Feld angelegt und zuerst die noch vorhandene Leitfähigkeit des Phosphors im Dunkeln gemessen. Dieser Effekt im Dunkeln wurde bei der späteren

---

1) Vgl. über diese Erscheinung bei Benzin: H. Hertz, Wied. Ann. 20. p. 279. 1883. Bei den Phosphoren: P. Lenard u. Sem Saeland, l. c. p. 497.

Messung in Abzug gebracht. Sodann wurde belichtet, 1 Sek. nach der Belichtung die Erdung zum Elektrometer aufgehoben und der Gang des Elektrometerfadens beobachtet. Die einfachsten Beobachtungen, gemacht an einem CaBiNa-Phosphor mit der gleichen Zusammensetzung wie bei Öder, bestätigten im wesentlichen die eingangs erwähnten Resultate Öders. Es zeigte sich aber noch eine interessante Erscheinung. Legte man an den Kondensator eine gewisse positive Spannung, belichtete und maß den Ausschlag im Elektrometer, erdete man das Elektrometer kurz und wechselte schnell die Richtung des Feldes — ohne Belichtung —, belichtete wieder, so zeigte sich ein nahezu doppelt so großer Ausschlag des Elektrometers von entgegengesetzter Richtung. Dieser letztere Ausschlag ließ sich bei wiederholter Umkehr des Feldes während der Belichtung in gleicher Größe beliebig oft erhalten. Der erstere Ausschlag jedoch nur dann, wenn der Phosphor durch längeres Warten regeneriert war.

Bei den Versuchen mit spektral zerlegtem Licht wurden für das sichtbare Gebiet des Spektrums vorzugsweise Farbgläser und Farbstofflösungen verwandt, während für den violetten und ultravioletten Teil eine Quarzquecksilberamalgameleuchte nach Arons für 220 Volt Netzspannung benutzt wurde. Die Farbgläser und Farbstofflösungen konnten zwischen das Wassergefäß und dem Kondensator eingeschoben werden. Man konnte so aus der Gesamtstrahlung der Nernstlampe beliebig kleine Spektralbezirke herausblenden. Bei der Quarzquecksilberlampe wurden folgende Linien zur Messung benutzt: 579  $\mu\mu$ , 546  $\mu\mu$ , 435  $\mu\mu$ , 407—404  $\mu\mu$ , 366  $\mu\mu$ , 334  $\mu\mu$ , 313  $\mu\mu$ , 265—280  $\mu\mu$ , 256  $\mu\mu$ . Diese Linien wurden aus dem Gesamtspektrum durch einen verschiebbaren Spalt herausgeblendet, der bei jeder einzelnen Linie eine der Breite der Linie angepaßte Weite besaß, die aufgeschrieben und so später genau wieder eingestellt werden konnte. Um eine möglichst große Lichtstärke zu erzielen, wurde die Lichtquelle selbst an Stelle des Spaltes gestellt.<sup>1)</sup> Jedoch war manchmal ein Übergreifen auf andere unmittelbar benachbarte Linien nicht zu vermeiden.

---

1) Es wurde dieselbe Anordnung des Spektralapparates benutzt, wie bei Hrn. P. Lenard, l. c. p. 643. 1910.



Die Quarzlampe selbst befand sich in einem Holzkasten, durch den vermittels einer Wasserstrahlpumpe ständig Luft gesaugt wurde. Sorgte man auf diese Weise für gleichmäßige Kühlung, so konnte man die Lampe stundenlang bei bestimmter Stromstärke und Spannung mit befriedigender Konstanz brennen lassen. Die Strahlungsintensitäten der einzelnen Spektralbezirke und auch der Spektrallinien mußte durch besondere Messungen mit einer Wismut-Antimon-Thermosäule und einem Panzergalvanometer ermittelt werden, da die Nichtübereinstimmung der bereits vorliegenden Messungen über die Intensitäten der Quecksilberlinien<sup>1)</sup> zeigen, daß diese relativ zueinander je nach den Belastungsverhältnissen der Lampe stark wechseln.

Tabelle I.

Farbfilter	Spektralbezirk	Galvanometer- ausschlag Verhältniszahlen
Nernstlampe ohne Ultrarot	—	1000
I. Violett	ca. 350—400 $\mu\mu$	8,0
II. Violett	„ 400—430 „	31,0
III. Violett	„ 350—460 „	55,0
IV. Blaugrün	„ 450—490 „	8,0
V. Grün	„ 460—530 „	16,0
VI. Gelb	„ 570—600 „	39,0
VII. Rot	„ 600—700 „	47,0
Quecksilberlinien	579 „	45,5
„	546 „	20,7
„	435 „	22,5
„	407—404 „	15,8
„	366 „	29,2
„	334 „	25,5
„	313 „	28,0
„	265—280 „	16,3
„	256 „	5,5

Wir finden in Tab. I die Energien der einzelnen Spektralbezirke in willkürlichen Einheiten ausgedrückt. Die Gesamt-

1) A. Pflüger, Phys. Zeitschr. 5. p. 414. 1904 und Ann. d. Phys. 13. p. 890. 1904; E. Ladenburg, Phys. Zeitschr. 5. p. 525 u. 556. 1904.

strahlung der Nernstlampe ohne Ultrarot ist 1000 solcher Einheiten.

Um die Wirkung verschiedener Spektralbezirke auf gleiche Intensitäten beziehen zu können, mußte zuerst die Abhängigkeit des Effektes von der Intensität der Strahlung bei verschiedenen Farben untersucht werden, was übrigens auch an sich von Belang schien. Aus Gründen, die Öder<sup>1)</sup> in seiner Arbeit angibt, wurde immer der Ausschlag des Elektrometers nach 40 Minuten dazu benutzt. Die Schwächung des Lichtes bei den einzelnen Farbfiltern wurde durch Einschaltung von dünnen Schleiern<sup>2)</sup> in den Strahlengang erreicht. Die Lichtabschwächungen der einzelnen Schleier wurden mit Hilfe eines Bunsenschen Photometers bestimmt. Vermittelst dieser Schleier wurden die Intensitäten bei den einzelnen Filtern geschwächt und der Elektrometersausschlag nach 40 Minuten gemessen.

Der Verlauf der Kurven, die man erhält, wenn man als Abszisse die Intensität des bestrahlenden Lichtes und als Ordinate den Elektrometersausschlag in Skalenteilen aufträgt, ist ähnlich dem der Kurven Öders.<sup>3)</sup> Der Effekt erreicht bei den für die aktinodielektrische Wirkung wirksamsten Spektralgebieten schon bei verhältnismäßig geringen Intensitäten nahezu seinen Maximalwert. Bei den Versuchen im Violett und Ultraviolett zeigte sich öfters der Effekt bei negativer Spannung etwas größer, als der bei positiver Spannung, was jedenfalls auf lichtelektrische Wirkung zurückzuführen war. Es wurde deshalb der Effekt in diesen Spektralgebieten nur bei positiver Spannung gemessen.

Um nun ein anschauliches Bild von der Wirksamkeit der einzelnen Wellenlängengebiete zu erhalten, sind in Fig. 2 jeweils die Elektrometersausschläge nach 40 Minuten Bestrahlung für gleiche Energie als Ordinaten aufgezeichnet; als Abszisse ist die Wellenlänge aufgetragen. Bei den Farbfiltern, die über ein größeres Wellenlängengebiet hinausreichen,

1) C. Ramsauer u. W. Haußer, l. c. p. 453.

2) Es wurden dieselben Schleier benutzt, wie in der Arbeit der Herren P. Lenard u. C. Ramsauer, Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. 32. Abh. p. 17. 1910.

3) Vgl. C. Ramsauer u. W. Haußer, l. c. Fig. 7 und vgl. damit F. Schmidt, Diss. Heidelberg 1913. p. 27. Fig. 4.

ist der Effekt für die mittlere Wellenlänge aufgezeichnet, bei den Quecksilberlinien für die in Betracht kommende Linie. Die mit Kreisen bezeichneten Punkte sind aus der Kurve Öders (l. c. Fig. 8) entnommen. Es sind immer je zwei Punkte der Öderschen Kurve zu einem Mittelwerte vereinigt und proportional auf gleichen Maßstab mit der Fig. 2 dieser Arbeit reduziert. Man sieht aus der Kurve, daß die rote Strahlung von intensiver Wirkung ist, was schon die Herren P. Lenard und Sem Saeland fanden. Die Wirkung der ultraroten Strahlung im Vergleich zu der im sichtbaren Gebiet ist sehr gering, was durch einen Versuch mit einer konzentrierten

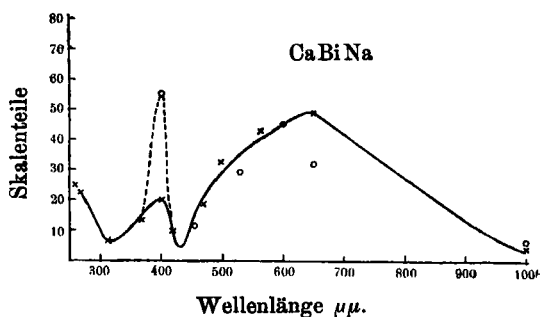


Fig. 2.

Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff und einer solchen von Kaliumbichromat in verdünnter Schwefelsäure nachgewiesen wurde. Der Verlauf der Kurve in Fig. 2 ist nun folgender: Von einem Maximum ab im Rot sinkt die Kurve allmählich zu einem Minimum bei etwa 415—420  $\mu\mu$ , darauf steigt die Kurve wieder an, allerdings nur etwa bis zu einem Drittel des Wertes im Roten, um dann abermals ein Minimum bei ungefähr 320  $\mu\mu$  zu erreichen. Noch weiter im Ultraviolett ist wieder ein starkes Steigen der Wirkung zu beobachten. Auch die Punkte, die aus der Kurve Öder entnommen worden sind, fügen sich gut in unsere Figur ein. Das erste Minimum hatte Öder schon gefunden und zwar zwischen 400 und 500  $\mu\mu$ . Es war also das zweite Minimum eine vollkommen neue Erscheinung.

Auffallenderweise fallen nun die Minima der Kurve mit den Stellen der beiden Erregungsmaxima  $d_1$  und  $d_2$  des CaBi-

Phosphors<sup>1)</sup> zusammen.<sup>2)</sup> Man kann sich daher die Minima so erklären: An den Stellen der Erregungsmaxima wird die gesamte Lichtenergie in den allerersten Schichten des Phosphors absorbiert<sup>3)</sup>, um für die Erregung der Phosphoreszenz verbraucht zu werden. Die aktinodielektrische Wirkung muß also an diesen Stellen nur gering zur Geltung kommen. Ist dieser Schluß richtig, so müssen diese Minima auch bei anderen Phosphoren an den Stellen ihrer Erregungsmaxima auftreten. Dies bestätigte sich in den folgenden Versuchen: Zuerst wurde die Abhängigkeit der aktinodielektrischen Wirkung von der Wellenlänge bei einem SrBi-Phosphor untersucht. Seine Zusammensetzung war die von Tab. I in Nr. 1 1904 der Arbeit der Herren Lenard und Klatt. In der Tat zeigte auch dieser Phosphor die Minima der Wellenlängenabhängigkeitskurve an den Stellen seiner Erregungsmaxima bei etwa 330 und 436  $\mu\mu$ .<sup>4)</sup>

Sodann wurde CaS auf seine aktinodielektrische Wirkung hin untersucht. Es wurde nach den Angaben der Herren Lenard und V. Klatt hergestellt. Enthielt es keinerlei Spuren von Metall, so mußten die Minima in der Kurve verschwinden. Die Kurve, die bei dem CaS erhalten wurde, zeigte deutlich ihre Minima an Stellen des  $\text{CaCu}\alpha d_1$ -Erregungsmaximums und des  $\text{CaCu}\alpha d_2$ -Erregungsmaximums. Ein Minimum bei  $\text{CaCu}\alpha d_3$  konnte nicht nachgewiesen werden. Es war also das Sulfid durch Kupfer verunreinigt. Dies ist jedoch ganz in Übereinstimmung mit der stets gemachten Erfahrung (P. Lenard und V. Klatt, l. c. 1904. p. 657), daß Kupfer niemals vollständig entfernt werden konnte, so daß seine Phosphoreszenzbande  $\alpha$  stets in allen gereinigten Präparaten sich zeigte. Auch an dem hier benutzten Sulfid ließ sich nach Erregung an einer Eisenlampe das schwach grünlich-blaue Leuchten von  $\text{CaCu}\alpha$  deutlich erkennen.

1) P. Lenard, Ann. d. Phys. 31. 1910. Taf. III.

2) Hr. W. E. Pauli hat auch bei Anthracen ein Minimum des aktinodielektrischen Effektes an der Stelle des Maximums der Erregungsverteilung gefunden. W. E. Pauli, Ann. d. Phys. 40. p. 689. 1913.

3) P. Lenard, Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. 5. Abh. 1912. p. 33.

4) F. Schmidt, l. c. Figg. 6 u. 7 für CaS.

Es kann demnach als festgestellt gelten, daß sämtliche beobachtete spektrale Minima der aktinodielektrischen Wirkung mit den Erregungsmaxima des betreffenden Präparates zusammenfallen, also durch Lichtundurchlässigkeit des Präparates bedingt sind; zugleich ist auch bestätigt, daß die aktinodielektrische Wirkung nicht mit der Erregung der Phosphore zusammenhängt.

**Versuche mit sehr dünnen Schichten (0,01 mm).  
Bestrahlung mit weißem Licht.**

Die große Verschiedenheit der aktinodielektrischen Wirkung bei den einzelnen Wellenlängen rührte also von der verschiedenen Eindringungstiefe des die Wirkung erregenden Lichtes in die Phosphorschichten her. Es mußten also zu den Versuchen, die die Abhängigkeit des Effektes von der Wellenlänge einwandfrei darstellen sollten, Phosphorschichten benutzt werden, die durch das Licht voll durchstrahlt würden. Hr. Lenard<sup>1)</sup> fand nun, daß das phosphoreszenzerregende Licht bei großer Intensität nur bis in eine Tiefe von 0,014 mm merklich ungeschwächt in die CaBi-Phosphorschicht eindringt und daß es in 0,057 mm Tiefe schon nahezu völlig absorbiert ist. Licht von anderer Wellenlänge, als von derjenigen der Erregungsmaxima dringt bedeutend tiefer in den Phosphor ein. So durchdringt Licht von der Wellenlänge der Emissionsbande noch merklich eine Schicht von 0,4 mm Dicke. Wenn man also Phosphorschichten von etwa 0,01 mm Dicke herstellt, so ist man sicher, daß die ganze Schicht von Licht jeder Farbe voll durchdrungen wird.

Die Herstellung von solchen dünnen Schichten geschah nach der von Hrn. Haußer<sup>2)</sup> ausgearbeiteten Methode.

Neben der einwandfreien Aufstellung der Abhängigkeitskurve von der Wellenlänge des bestrahlenden Lichtes konnten aber die dünnen Schichten noch die Möglichkeit einer Entscheidung in der Hauptfrage unseres Gegenstandes liefern, nämlich in der Frage: Wie wirkt das Licht auf den Phosphor, um den aktinodielektrischen Effekt hervorzubringen. Man stelle

---

1) P. Lenard, Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, math.-naturw. Klasse, 5. Abh. 1912, p. 32.

2) W. Haußer, Dissertation, Heidelberg 1913. p. 18.

sich vor, man hätte den Phosphor in der völlig durchstrahlten Schicht auf die untere Kondensatorplatte gebracht und bestrahle ihn durch die versilberte Glasplatte, die isoliert zum Elektrometer geführt ist, mit weißem Licht. Der Phosphor befinde sich in einem elektrischen Felde von bestimmter Stärke. Im ersteren Falle, wenn eine Verschiebung der Elektrizitäten in jedem einzelnen Molekül stattfinden soll, und wenn dieselbe Zeit zu ihrer Herstellung braucht, müßte der Elektrometerfaden erst schneller, dann immer langsamer wandern und endlich, wenn alle Moleküle des Phosphors elektrisch polarisiert sind, vollkommen auf einem konstanten Endwert verharren. Erst bei Umkehr der Feldrichtung könnte die Wiederholung der Erscheinung hervorgerufen werden. Es sind dies eben dieselben Erscheinungen, wie sie die früheren Versuche an den dicken Schichten zeigten. Ruft hingegen die Bestrahlung ein Leitvermögen in der Phosphorschicht hervor, so müßte der Elektrometerfaden bei dünner, genügend durchstrahlter Schicht dauernd weiter wandern. Bei Versuchen mit dicken Schichten kann diese letztere Erscheinung nicht auftreten, da das Licht nicht bis zur alleruntersten Schicht des Phosphors dringt, und daher immer die unterste Schicht isolierend bleibt; es zeigt sich dann nur dieselbe Erscheinung, wie bei der dielektrischen Polarisation.

Es wurden nun solche Versuche angestellt, um eine Entscheidung zwischen dielektrischer Verschiebung und Leitvermögen zu treffen. Es wurde die Phosphorschicht von 0,021 mm Dicke benutzt. Vor dem Einsetzen der Schicht in das Versuchsgefäß wurde dieselbe mittels einer elektrischen Glühvorrichtung solange ausgeglüht, bis kein Leuchten der Schicht im Dunkeln zu erkennen war. Dies geschah, um den Phosphor in wohldefiniertem, völlig unerregtem Anfangszustand zu haben. Die Einsetzung des Phosphors in das Beobachtungsgefäß geschah vollkommen im Dunkeln. Es genügte schon die Anlegung einer Spannung von 2 Volt an die untere Kondensatorplatte, um den Effekt gut meßbar zu machen. Ein Kontrollversuch mit dem Kondensator ohne Phosphor ließ erkennen, daß die Schwefelsilberschicht bei Bestrahlung keinerlei Störungen hervorrief. Die Kurven in Fig. 3 geben die Versuchsergebnisse wieder. Kurve *a* zeigt

das Leitvermögen des Phosphors im Dunkeln unmittelbar nach Anlegung der Spannung. Nach 5 Minuten war schon das Feld im Kondensator vernichtet. Nachdem 5 Minuten die obere Platte geerdet war, wurde wiederum das Leitvermögen im Dunkeln gemessen. Es zeigte sich ein bedeutend langsamerer Ausgleich der Spannungen und endlich nach 24 Stunden dauernder Stromwirkung isolierte der Phosphor vollständig. Nach weiterer dauernder Stromwirkung von 25 Stunden wurde zuerst der Effekt im Dunkeln gemessen,

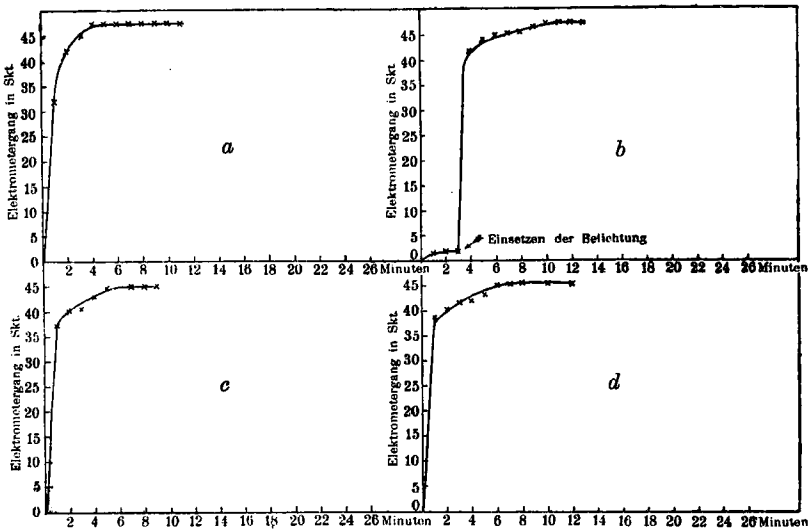


Fig. 8.

der Phosphor isolierte. Darauf wurde plötzlich belichtet. Man sieht aus der Kurve *b*, daß sofort nach der Belichtung der Gang des Elektrometerfadens schnell einsetzte. Jetzt wurde der Elektrometer wieder geerdet, eine Stunde lang dauernd belichtet und der Elektrometer wieder mit der oberen Platte verbunden. Wäre eine Verschiebung der Elektrizitäten in den Phosphorteilchen durch das Licht erfolgt, so müßte jetzt kein Ausschlag oder wenigstens ein bedeutend kleinerer als vorher entstehen. Wie man aus der Kurve *c* ersieht, war der Ausschlag genau derselbe wie vorher. Auch nach einer weiteren Stunde Belichtung trat wiederum der gleiche Ausschlag ein (Kurve *d*). Dadurch war bewiesen, daß der Effekt

auf der Erzeugung eines Leitvermögens im Phosphor während der Bestrahlung beruhe. In der Dunkelheit ging das Leitvermögen wieder langsam zurück bis zur völligen Isolation.

#### Wirkung von spektral zerlegtem Licht.

Wie schon durch die Versuche an den dicken Schichten gezeigt ist, hat bei den Phosphoren Licht jeder Farbe eine

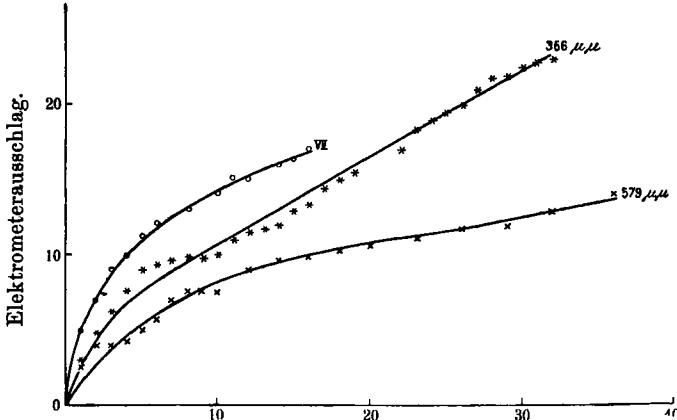


Fig. 4.

wesentliche leitfähigkeitserhöhende Wirkung. Die Versuche an den dünnen Schichten mußten die Unterschiede in der Wirkung der einzelnen Farben gut erkennbar machen. Fig. 4

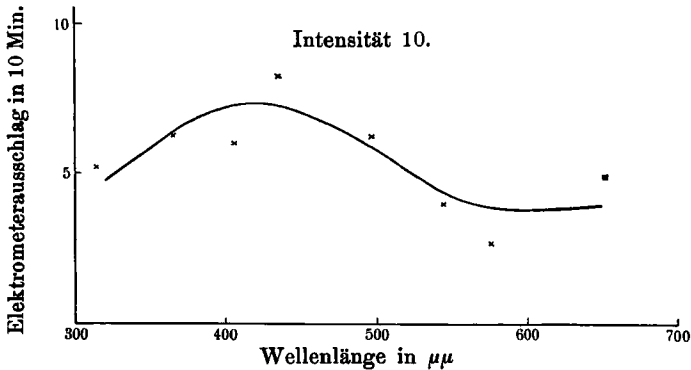


Fig. 5.

zeigt drei der charakteristischen Kurven und zwar die Wirkung des Lichtes von der Wellenlänge 600—700  $\mu\mu$  (VII), 579  $\mu\mu$



und  $366 \mu\mu$ . Alle Kurven sind auf gleiche Energie bezogen. Man sieht, daß die Kurven anfangs stark ansteigen und dann allmählich in eine gerade Linie übergehen, welche indes nicht horizontal, sondern nach aufwärts gerichtet ist. Die Schiefe dieser geraden Linie gibt das Maß der Leitfähigkeit, welche durch die betreffenden Lichtwellen im Phosphor entsteht. Es ist deshalb in Fig. 5 der Elektrometergang in 10 Minuten während des geraden Verlaufs der Kurve aufgetragen. Man findet eine etwas größere Wirkung des violetten Lichtes als des roten. Ein Maximum der Wirkung befindet sich bei ungefähr  $430 \mu\mu$  im Violetten, ein Minimum bei  $580 \mu\mu$  im Gelben.

#### Theoretisches.

Es ist durch die Untersuchungen an den Schichten von  $0,01$  mm Dicke hinreichend bewiesen worden, daß das Licht eine Leitfähigkeit im Phosphor erzeugt. Es handelt sich nun darum, die Resultate zu deuten, die an den dickeren Schichten gewonnen worden sind. Denken wir uns den Kondensator der Versuchsanordnung mit dem darin befindlichen Phosphor in dicker Schicht.  $b$  sei die untere Platte des Kondensators,  $p$  der Phosphor und  $a$  das Netz. Es sei nun an die untere Platte eine bestimmte positive Spannung gelegt. Am Netz wird dann eine negative Elektrizitätsmenge influenziert. Das Netz, das mit dem Elektrometer verbunden ist, sei geerdet. Infolgedessen wird die abgestoßene positive Menge zur Erde fließen. Der Phosphor werde durch das Netz bestrahlt und das Netz mit dem Elektrometer isoliert. Durch die Bestrahlung wird dem Phosphor ein nach der Tiefe zu abnehmendes Leitvermögen erteilt, da die Lichtstrahlen mit zunehmender Tiefe immer mehr absorbiert werden. Bis zur Tiefe  $X$  dringe das Licht merklich in die Phosphorschicht ein; von  $X$  bis zur unteren Platte bleibt die Phosphorschicht isolierend. Mit dem Augenblick der Belichtung wird eine Verschiebung der Elektrizitäten in den Schichten des Phosphors erfolgen, denen ein Leitvermögen erteilt wurde, und zwar zuerst schnell, dann immer langsamer gemäß der in der Tiefe bei der dort ge-

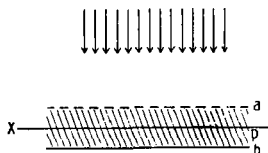


Fig. 6.

ringen Lichtintensität nur langsam sich herstellenden Leitfähigkeit. Der zeitliche Verlauf der Lichtwirkung würde sich also genau so ergeben, wie der Verlauf der Kurve Öders<sup>1)</sup> bei langdauernder Belichtung. Jetzt läßt sich auch die oben gefundene Erscheinung erklären, daß der Effekt bei frischem Phosphor kleiner ist, als der Effekt bei Umkehr des Feldes. Die Elektrizitätsmenge, die beim frischen Phosphor in ihn hineinwanderte, wird bei Umkehr des Feldes die eindringende Menge von entgegengesetzten Zeichen neutralisieren. Um denselben Zustand wie vorher im Kondensator herzustellen, muß daher eine größere oder sogar die doppelte Menge in den Phosphor wandern. Daß der Ausschlag manchmal doppelt so groß, manchmal kleiner ausfällt, liegt daran, daß bei der nötigen Erdung des Elektrometers während der Umkehr des Feldes schon ein Teil der Elektrizität im Dunkeln verloren geht. Bei Belichtung und Umkehr des Feldes geht natürlich die ganze eingedrungene Menge verloren.

Öder<sup>2)</sup> konnte aus seinen Versuchen noch nicht auf Leitung schließen, weil die Schichten dazu zu dick waren; er schließt folgendermaßen: Wenn bei Belichtung des Phosphors im elektrischen Felde eine Polarisierung zustande kommt, so wird diese wieder rückgängig durch Belichten ohne Feld, also bei Erdung. Bei diesem Rückgang muß der Elektrometersausschlag entgegengesetztes Vorzeichen haben. Beide Ausschläge müssen gleiche Größe haben, wenn der erste Ausschlag nur durch dielektrische Verschiebung und nicht durch Leitung entsteht. Man erkennt indes ohne Schwierigkeit, daß man auch diese Erscheinung mit obiger Anschauung vereinbaren und durch Leitung eines Teils der dicken Schicht erklären kann. Auch findet Öder bei seinen Versuchen, daß bei der zwischen der Belichtung unter Spannung und der nötigen Erdung des Elektrometers während der Messung ohne Spannung ein unkontrollierbarer Teil des Ausschlags verloren geht, so daß der zweite Ausschlag immer kleiner ausfällt, als der erstere. Die Erklärung hierfür liegt darin, daß bei der Entfernung der Belichtung der Phosphor

---

1) C. Ramsauer u. W. Haußer, l. c. p. 448, Fig. 3.

2) C. Ramsauer u. W. Haußer, l. c. p. 449, Fig. 4

sein Leitvermögen noch einige Zeit behält, allerdings nicht in gleicher Größe, wie während der Belichtung, aber immerhin noch genügend, um jenen Verlust zu bewirken.

Der aktinodielektrische Effekt muß, um das Leitvermögen unter dem Einfluß des Lichtes hervorzubringen, mit einer materiellen Ionenwanderung im Phosphor verbunden sein, was schon die Herren Lenard und Sem Saeland<sup>1)</sup> vermuteten. Würde das Leitvermögen dadurch hervorgerufen sein, daß durch das Licht freie Elektronen aus den Atomen ausgelöst würden, so wäre zu erwarten, daß ähnlich wie bei den Metallen das Leitvermögen bei Temperaturerhöhung abnehmen würde. Jedoch zeigten Versuche bei verschiedenen Temperaturen eine Zunahme des Leitvermögens während der Bestrahlung mit der Temperatur, welche Erscheinung für eine Ionenleitung im Phosphor sprach. Man kann also annehmen, daß das Licht die Moleküle des Phosphors elektrolytisch dissoziiert. Nach Schluß der Bestrahlung werden die Ionen wegen der großen inneren Reibung im Phosphor sich erst allmählich wieder vereinigen.

In der Tat habe ich polarisationsähnliche Erscheinungen an den dünnen, ebenso wie auch an den dicken Schichten beobachtet, darin bestehend, daß nach Belichtung unter Spannung ein Rückstrom in der Schicht am Elektrometer sich zeigte, als Licht und Spannung von der Schicht fortgenommen worden waren.<sup>2)</sup> Auch die Kurven in Fig. 4 stimmen damit überein, was dadurch zu erklären wäre, daß anfangs die Gegenkraft der Polarisation fehlte und erst allmählich zu einem erheblichen Werte anstieg.

Es ist also zur Genüge nachgewiesen, daß der aktinodielektrische Effekt in einer Leitfähigkeitserzeugung im Phosphor besteht und es ist sehr wahrscheinlich gemacht, daß die Leitung in einer Ionenwanderung im Phosphor besteht.

#### Zusammenfassung.

1. Die Resultate der Herren Lenard, Sem Saeland und Öder über den aktinodielektrischen Effekt werden im

---

1) P. Lenard u. Sem Saeland, l. c. p. 496.

2) Diese Erscheinung ist für dicke Schichten auch von Öder (l. c. p. 449) beobachtet worden.

wesentlichen bestätigt. Es zeigt sich jedoch, daß man zu reinen Erscheinungen nur bei Benutzung von sehr dünnen, durch Licht jeder Farbe vordurchstrahlten Schichten gelangt.

2. Die Minima des aktinodielektrischen Effektes, deren eines bereits von Öder gefunden wurde, fallen mit den Stellen der Erregungsmaxima des betreffenden Phosphors zusammen, sobald man dicke Schichten hat. Die Minima sind auf starke Absorption des erregenden Lichtes in den obersten Phosphorschichten zurückzuführen. Dünne, vordurchstrahlte Schichten zeigen diese Minima nicht.

3. Der aktinodielektrische Effekt besteht in einer Leitfähigkeitserzeugung im Phosphor durch das Licht; er ist über das ganze sichtbare Spektrum ziemlich gleichförmig verteilt.

4. Die Leitfähigkeit in den Phosphorschichten während der Bestrahlung beruht sehr wahrscheinlich auf einer materiellen Ionenwanderung durch den Phosphor.

Die vorliegende Arbeit wurde im radiologischen Institut der Universität Heidelberg auf Anregung von Hrn. Geheimrat Lenard ausgeführt. Für das stets rege Interesse, das Hr. Geheimrat Lenard dieser Arbeit entgegengebracht hat, sowie für seine vielfachen Ratschläge möchte ich auch an dieser Stelle meinen innigsten Dank aussprechen. Auch Hrn. Privatdozent Dr. Ramsauer bin ich für die liebenswürdigen Unterstützungen im Verlaufe dieser Arbeit zu stetem Danke verpflichtet.

(Eingegangen 10. März 1914.)