



UNIVERSITÄTS-  
BIBLIOTHEK  
PADERBORN

## **Lehrbuch der Experimentalphysik**

**Lommel, Eugen von**

**Leipzig, 1908**

282. Kathodenstrahlen. Elektronen. Röntgenstrahlen

---

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](#)

die Abnahme des Potentials am kleinsten. Dann aber folgt von der Grenze des negativen Glimmlichtes durch den Kathodendunkelraum hindurch bis zur Kathode ein sehr steiler Abfall des Potentials, der sog. Kathodenfall. Er hat bei allmählich steigender Verdünnung einen konstanten Wert, solange das Glimmlicht die Kathode noch nicht vollständig bedeckt (normaler Kathodenfall); bei abnehmendem Druck oder gesteigerter Stromstärke dehnt sich dann das Glimmlicht nur weiter über die Kathode hin aus. Sobald aber die Kathode vom Glimmlicht ganz eingehüllt ist, tritt bei weiterer Verdünnung oder steigender Stromstärke eine Zunahme des Kathodenfalles ein (anormaler Kathodenfall).

Eine Erklärung der komplizierten Erscheinungen in Geißlerschen Röhren läßt sich auf Grund der Vorstellung entwickeln, daß zunächst durch das elektrische Feld eine Ionisierung des Gases hervorgerufen wird, und daß die gebildeten Ionen unter dem Einfluß der elektrischen Kraft in dem verdünnten Gase so hohe Geschwindigkeiten erlangen, daß sie einerseits beim Zusammenstoß mit den Gasmolekülen Lichtschwingungen hervorrufen, anderseits durch den Stoß eine weitere Ionisierung des Gases bewirken.

**282. Kathodenstrahlen. Elektronen. Röntgenstrahlen.** Bei fortgesetzter Verdünnung des Gases in einer Geißlerschen Röhre verschwindet schließlich das positive Licht ganz; die Röhre zeigt nur noch ein schwaches Leuchten des negativen Glimmlichts. Gleichzeitig aber sieht man die Glaswand an den der Kathode gegenüberliegenden Stellen in grünlichem Lichte aufleuchten. Diese bei hohen Verdünnungen auftretende Erscheinung röhrt von einer Wirkung her, die in Form einer Strahlung senkrecht von der Kathode ausgeht; man hat ihr deswegen nach Goldsteins Vorschlag den Namen Kathodenstrahlen gegeben.

Während der positive Lichtstrom in einer gewöhnlichen Geißlerschen Röhre wie ein beweglicher Stromleiter die Verbindung nach der negativen Elektrode herstellt, sich stets nach dieser hinwendet und allen etwa vorhandenen Krümmungen der Röhre folgt, gehen in Röhren, in denen die Luft bis auf etwa ein Millionstel einer Atmosphäre verdünnt ist, die Kathodenstrahlen in geraden Linien senkrecht von der Kathode aus und werden in ihrer Richtung durch die Lage der Anode nicht im mindesten beeinflußt. Crookes (1879) bediente sich zum Nachweis dieser von Hittorf (1869) entdeckten Eigentümlichkeit der folgenden Einrichtung. In die **V**-förmige Röhre Fig. 257 sind die Drähte *a b c* eingeschmolzen, deren jeder eine kleine kreisförmige Blechplatte trägt; setzt man *a* mit dem negativen, *b* mit dem positiven Pol des Induktionsapparats in Verbindung, so pflanzen sich die Kathodenstrahlen in gerader Linie nur bis *c* fort, ohne dort um die Ecke zu biegen; denn nur der Schenkel *a c* leuchtet in grünem Licht. Verbindet man aber *a* mit dem positiven, *c* mit dem negativen Pol, so ergießen sich die Kathodenstrahlen in der zur Kathodenplatte *c* senkrechten Richtung geradlinig nach *b* hin, und nur der Schenkel *b c* zeigt die grüne Phosphoreszenz, obwohl die Entladung nur durch den Schenkel *a c* hindurchgeht. Die Kathodenstrahlen gehen also senkrecht von der Kathode aus, unbekümmert um den Weg, den die Entladung befolgt. Man kann diesen wesentlichen Unterschied zwischen der elektrischen Entladung in mäßig verdünnter und sehr stark verdünnter Luft sehr auffallend an den beiden ganz gleichen, kugel-

förmigen Gefäßen *A* und *B* (Fig. 258) wahrnehmen, deren ersteres nur bis zu einem mäßigen Grade (2 mm Quecksilber), das andere aber bis auf etwa ein Millionstel Atmosphäre ausgepumpt ist. Verbindet man die Elektrode *a*, welche die Form einer Schale hat, mit dem negativen, die Elektroden *b*, *c*, *d* der Reihe nach mit dem positiven Pol, so sieht man in dem ersten Gefäß einen roten Lichtstrom von der jeweiligen positiven Elektrode nach der negativen Elektrode sich ergießen, und an letzterer die blaue negative Lichthülle auftreten, in dem anderen Gefäß aber sieht man nichts von einer positiven Lichtgarbe; von der schalenförmigen negativen Elektrode jedoch gehen die Kathodenstrahlen aus, laufen ungefähr im Mittelpunkt der Kugel, von welcher die Schale ein Abschnitt ist, wie in einem Brennpunkt

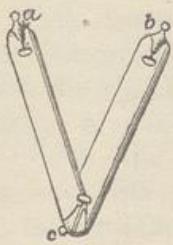
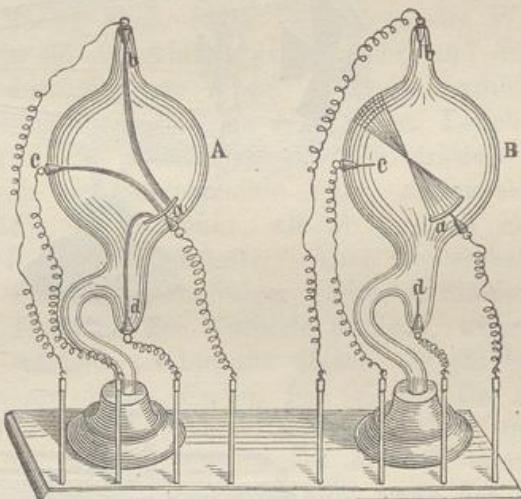


Fig. 257.

Fig. 258.  
Crookes'sche Röhren.

zusammen, gehen darüber hinaus wieder kegelförmig auseinander und erzeugen auf der gegenüberliegenden Glaswand einen Fleck grünen Phosphoreszenzlichts, der sich heiß anfühlt; diesen Weg schlagen die Kathodenstrahlen unbeirrt ein, welchen der Drähte *b*, *c*, *d* man auch zur Anode machen mag. Die Kathodenstrahlen selbst sind nicht sichtbar. Man kann ihren Weg nur verfolgen an den Wirkungen, die sie auf Körper, die sie treffen, ausüben. Diese Wirkungen sind verschiedener Art.

Ein Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, erwärmt sich: wird in der Glaskugel Fig. 258 *B* im Krümmungsmittelpunkt der schalenförmigen negativen Elektrode *a* ein Stück Platin-Iridium angebracht, so wird es durch die gesammelten Strahlen bis zur Weißglut erhitzt und schließlich geschmolzen.

Da wo die Strahlen des Kathodenlichts auf die Glaswand des Gefäßes treffen, erregen sie das Glas zu lebhaftem Selbstleuchten (Fluoreszenz und Phosphoreszenz); das Thüringer Glas, aus welchem

diese Gefäße gewöhnlich verfertigt werden, leuchtet hell apfelgrün, Uranglas dunkler grün, englisches Glas blau. Um die Phosphoreszenz anderer Körper unter der Einwirkung der Kathodenstrahlen zu beobachten, schließt man sie in Röhren wie Fig. 259 ein; Rubin und Kalkspat leuchten rot, Diamant hellgrün, Galmei smaragdgrün, Phenakit blau, Pektolith gelb.

Die Strahlen des Kathodenlichts werden von einem festen Körper, auf den sie treffen, aufgehalten; in dem birnförmigen Gefäß Fig. 260 trägt die positive Elektrode ein aus Aluminiumblech ausgeschnittenes Kreuz *b*; da nur die an dem Kreuz vorbeigehenden Strahlen *a c*, *a d* der Kathode *a* zur gegenüberliegenden Glaswand gelangen und deren

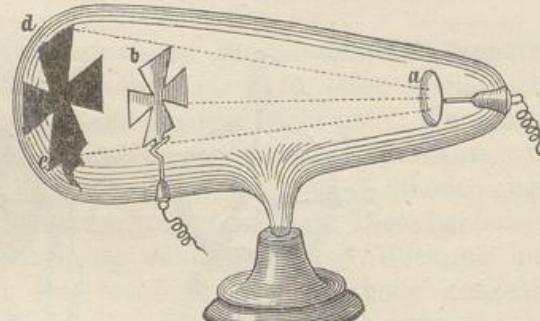
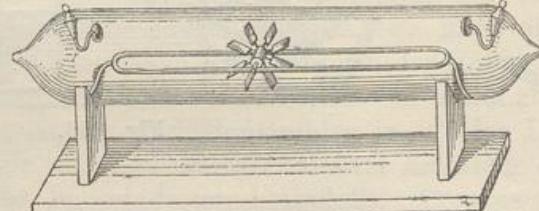


Fig. 260.

Fig. 261.  
Crookes'sche Röhre.

Phosphoreszenz erregen, so erscheint daselbst auf hellgrün leuchtendem Grunde der dunkle Schatten des Kreuzes. Wirft man jetzt das um ein Scharnier drehbare Kreuz durch eine leichte Erschütterung des Apparates um, so daß die geradlinigen Kathodenstrahlen nun die gegenüberliegende Glaswand ungehindert treffen, so tritt das vorher dunkle Kreuz jetzt hell auf dunklerem Grunde hervor; das Glas hat nämlich an den schon vorher von den Strahlen getroffenen Stellen sein Phosphoreszenzvermögen teilweise verloren; der Teil aber, welcher vorher beschattet war, ist noch nicht „ermüdet“, sondern besitzt noch frische Empfänglichkeit.

Die Kathodenstrahlen vermögen, wie Crookes entdeckt hat, mechanische Wirkungen hervorzubringen. In der Röhre Fig. 261 ist eine gläserne Schienenbahn angebracht, auf welcher ein kleines Rad

mit Glimmerschaufeln rollen kann; verbindet man die oberhalb der Bahn gelegenen Elektroden mit den Polen des Induktors, so wird das Rad von der Kathode nach der Anode hingetrieben, als ob von jener her ein Luftstrom gegen die oberen Schaufeln bliese. Doch ist es nach neueren Untersuchungen nicht richtig, diese Erscheinungen auf eine Stoßwirkung der Kathodenstrahlen zurückzuführen. Vielmehr ist es wahrscheinlich, daß die Wärmewirkung der Kathodenstrahlen hier eine ähnliche Rolle spielt, wie die Wärmewirkung der Lichtstrahlen bei den Radiometern (s. diese 350).

Die Kathodenstrahlen schienen in die Röhre gebannt zu sein, so daß Körper, die man ihrer Wirkung aussetzen wollten, in die Röhre eingeschlossen werden mußten, bis es Lenard (1893) gelang, sie ins Freie zu lassen. Nachdem Hertz gefunden, daß dünne Blattmetalle für Kathodenstrahlen durchlässig sind, fügte Lenard in die Wand einer Hittorf'schen Röhre ein dünnes Aluminiumblatt ein, und durch dieses dunkle „Fenster“ in durchsichtiger Wand traten die Kathodenstrahlen hinaus in die Luft und erregten sie zu diffusem Leuchten.

Auch die Kathodenstrahlen unterliegen der Einwirkung des Magnets. Sie werden durch ein magnetisches Feld, entsprechend der Linken-Hand-Regel (254), so abgelenkt, als ob positive Elektrizität in ihnen auf die Kathode zuströmte. Aber sie verhalten sich dabei (nach Hittorf) wie ein geradliniger steifer Stromfaden, der nur mit seinem einen Ende an der Kathode festsitzt, während der positive Lichtstrom in weniger verdünnten Gasen als ein biegssamer Leiter erscheint, dessen beide Enden fest sind. Da also die Kathodenstrahlen offenbar eine Erscheinung sind, die nicht auf die Kathode zu, sondern von ihr fortwandert, so hat man es in ihnen mit einem Strom negativer Elektrizität zu tun, der von der Kathode ausgeht. Es ist auch gelungen (Perrin, 1895) nachzuweisen, daß sie negative Ladungen mit sich führen. Treffen sie auf einen isolierten Körper, so laden sie ihn negativ. Von einem positiv geladenen Körper werden sie angezogen, von einem negativ geladenen, z. B. einer zweiten Kathode, werden sie abgestoßen (Deflexion, Goldstein).

Alle Eigenschaften der Kathodenstrahlen lassen sich durch die Annahme erklären, daß negativ geladene kleine Massenkörper von der Kathode fortgeschleudert werden. Ist  $m$  die Masse,  $e$  die elektrische Ladung eines solchen Teilchens und ist  $V$  die Potentialdifferenz des Kathodenfalles, die die Teilchen von der Kathode forttreibt, so ist die Geschwindigkeit  $v$ , mit der ein Teilchen das Gebiet des Kathodenfalls verläßt und z. B. die Röhre  $cb$  in Fig. 257 durchfliegt, dadurch gegeben, daß die elektrische Arbeit  $eV$  gleich der lebendigen

Kraft  $\frac{1}{2}mv^2$  des Teilchens sein muß, also  $\frac{m}{e}v^2 = 2V$ . Fliegt anderseits ein solches Teilchen senkrecht zu den Kraftlinien eines magnetischen Feldes von der Stärke  $H$ , so wirkt eine Kraft  $Hev$  (280) auf das Teilchen senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung; die Bahn des Teilchens krümmt sich in einem konstanten magnetischen Felde zu einer kreisförmigen Bahn vom Radius  $r$ , indem die Zentrifugalkraft  $\frac{mv^2}{r}$  jener ablenkenden Kraft  $Hev$  das Gleichgewicht hält;

also ist  $\frac{m}{e} v = \mathfrak{H} \cdot r$ . Aus diesen beiden Beziehungen kann man, indem man für dieselben Kathodenstrahlen  $V$ ,  $\mathfrak{H}$  und  $r$  mißt, die Geschwindigkeit  $v$  der Bewegung der Teilchen und das Verhältnis  $\frac{e}{m}$  ihrer Ladung zu ihrer Masse ermitteln. Versuche dieser Art haben ergeben, daß die Geschwindigkeit dieser Teilchen ganz außerordentlich groß ist. Sie ist natürlich verschieden je nach den Kräften, die die Geschwindigkeit hervorbringen; aber sie hat stets Werte, die etwa zwischen  $\frac{1}{10}$  und  $\frac{1}{3}$  der Lichtgeschwindigkeit ( $3 \times 10^9$  bis  $1 \times 10^{10}$  cm/sec) liegen. Für das Verhältnis der Ladung zur Masse aber hat sich, wenn die Ladung in Coulombs ausgedrückt wird, ungefähr die Zahl  $2 \times 10^{-8}$  ergeben, d. h. 1 Gramm solcher Teilchen würde eine Ladung von  $2 \times 10^{-8}$  Coulombs mit sich führen. Ein Gramm Wasserstoffionen führt nur 96 540 oder nahezu  $1 \times 10^5$  Coulombs mit sich (211). Das Verhältnis der Ladung zur Masse ist also für die Kathodenstrahlteile ungefähr 2000 mal so groß wie für ein elektrolytisches  $H$ -Ion. Da es die oben (281) erwähnten Versuche über die Größe der Ladung eines Ions durchaus wahrscheinlich machen, daß auch die Ladung der Kathodenstrahlteilchen gleich dem elektrischen Elementarquantum ist, so folgt aus dem Werte für  $\frac{e}{m}$ , daß in den Kathodenstrahlen diese Ladung an einen Träger geknüpft ist, dessen Masse nur der zweitausendste Teil von der Masse eines Wasserstoffatoms ist. In den Kathodenstrahlteilchen haben wir es also nicht mehr mit Atomen der gewöhnlichen Materie zu tun, sondern mit einer Substanz von sehr viel feinerer Zerteilung. Es ist sogar fraglich, ob man den aus diesen Überlegungen hervorgehenden Wert der Masse eines Kathodenstrahlteilchens wirklich als Masse im Sinne der tragen Masse der gewöhnlichen Materie auffassen darf. Versuche von W. Kaufmann an Kathodenstrahlen von sehr großer Geschwindigkeit haben nämlich ergeben, daß das Verhältnis  $e/m$  bei hohen Geschwindigkeiten mit wachsender Geschwindigkeit erst langsam, dann immer rascher abnimmt, als ob die Masse  $m$  des Teilchens mit wachsender Geschwindigkeit größer und größer würde. Dieses Resultat läßt sich verstehen, wenn man sich vergegenwärtigt, daß eine mit solcher Geschwindigkeit bewegte Ladung ein magnetisches Feld um sich herum erzeugt (280), dessen Stärke um so größer ist, je schneller sich das Teilchen bewegt. Die Erzeugung dieses magnetischen Feldes und ebenso jede Verstärkung desselben, erfordert einen gewissen Aufwand von Energie, die dem Teilchen bei der Beschleunigung seiner Bewegung zugeführt werden muß. Die Versuche von Kaufmann lassen nun darauf schließen, daß die ganze Energie, die man aufwenden muß, um einem Kathodenstrahlteilchen eine bestimmte Geschwindigkeit zu erteilen, in der Energie des magnetischen Feldes enthalten ist, daß also den Teilchen ein Trägheitswiderstand im Sinne der gewöhnlichen Materie überhaupt nicht zukommt, sondern daß ihr Trägheitswiderstand ein scheinbarer, elektromagnetischer, von der Art der Selbstinduktion eines elektrischen Stromes ist.

Auf Grund dieser Ergebnisse betrachtet man die Kathodenstrahlteilchen als freie elektrische Atome, oder freie Elementarquanten der Elektrizität. Es hat sich für sie der Name Elektronen eingebürgert. Es ist aber bemerkenswert, daß alle Untersuchungen bisher nur das Vorhandensein negativer Elektronen ergeben haben. Alle positiv geladenen Ionen sind in ihrer Masse von der Größenordnung der gewöhnlichen materiellen Atome. Positive Ionen scheinen also aus einem neutralen Atom oder Molekül nur durch Abspaltung eines Elektrons, negative Ionen durch Anlagerung neutraler Atome oder Moleküle an ein freies Elektron zu entstehen.

Goldstein hat zuerst beobachtet, daß durch eine durchlöcherte Kathode von der Seite des Anodenraumes her eine Wirkung hindurchtritt, die sich in dem Raum hinter der Kathode ebenfalls in Form von Strahlen ausbreitet; da die Erscheinung besonders deutlich

hervortritt, wenn an die Löcher der Kathode nach rückwärts kurze röhrenförmige Kanäle angesetzt sind, hat Goldstein diese Strahlen als Kanalstrahlen bezeichnet. Nach neueren Untersuchungen ist es wahrscheinlich, daß die Kanalstrahlen von positiv geladenen Teilchen gebildet werden, die vor der Kathode auf diese zu- und durch ihre Löcher hindurchfliegen. Doch ist die Geschwindigkeit dieser Teilchen beträchtlich kleiner und ihre Masse entsprechend größer als die der Kathodenstrahlen. Das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse kommt dem eines Wasserstoffions nahe. (W. Wien.)

Die Erscheinungen der Kathodenstrahlen entwickeln sich am vollkommensten bei einem gewissen Grade der Verdünnung, etwa bei einem Druck von ein Milliontel Atmosphäre; darüber hinaus werden sie schwächer, und wenn man die Verdünnung noch weiter treibt durch fortgesetztes Auspumpen mit einer sehr guten Quecksilberluftpumpe und unter Anwendung von Stoffen, welche die noch vorhandenen Gasreste zu absorbieren vermögen, so kann man schließlich ein Vakuum erhalten, durch das elektrische Entladungen überhaupt nicht mehr hindurchgehen.

Die Kathodenstrahlen üben, wenn sie auf Körper auftreffen, noch eine andere sehr merkwürdige Wirkung aus. Röntgen (1895) fand, daß eine in die Nähe einer Hittorf'schen Röhre gebrachte fluoreszierende Substanz, z. B. Baryumplatincyanür, hell aufleuchtet, auch dann, wenn die Röhre mit schwarzem undurchsichtigen Karton umhüllt ist.

Er wies nach, daß von der Röhre, und zwar von den Stellen der Glaswand, die von Kathodenstrahlen getroffen werden, eine unsichtbare Strahlung ausgeht, welche die Kartonhülse durchdringt, und sich geradlinig nach allen Seiten verbreitet. Diese Strahlen, von Röntgen selbst X-Strahlen genannt, werden heute allgemein als Röntgenstrahlen bezeichnet. Man erhält kräftigere Wirkungen, wenn die Kathodenstrahlen nicht auf Glas, son-

dern auf ein in der Röhre angebrachtes Platinblech fallen. Man verstärkt ferner die Wirkung und erreicht den Vorteil, daß die Röntgenstrahlen alle nahezu von demselben Punkte ausgehen, indem man eine hohlspiegelartig geformte Kathode verwendet und das Platinblech in dem Brennpunkt der Kathodenstrahlen anbringt (Fokusröhren). Fig. 262 zeigt die Form einer solchen Röntgenröhre. Es empfiehlt sich im allgemeinen, das Platinblech *c*, die sogenannte Antikathode, mit der Anode *b* zu verbinden.

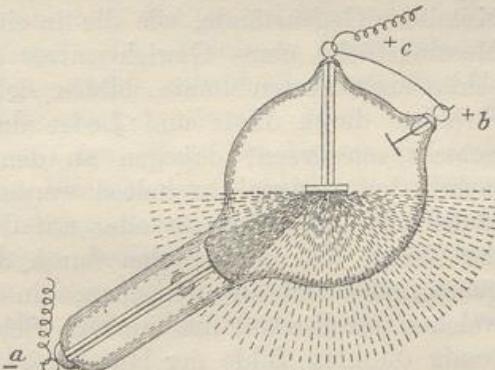


Fig. 262.  
Röntgenstrahlen.

Diese Röntgenschen Strahlen unterscheiden sich von den Kathodenstrahlen dadurch, daß sie von einem Magnet nicht abgelenkt werden; für sie sind alle Körper mehr oder weniger durchlässig; sie gehen leicht durch Papier, Holz, Leder, Hartgummi, auch durch nicht zu dicke Metallplatten. Die Durchlässigkeit ist bei gleicher Schichtdicke wesentlich bedingt durch die Dichte; das spezifisch schwere Blei ist bei 1,5 mm so gut wie undurchlässig, während eine zehnmal so dicke Schicht des leichten Aluminiums die Wirkung zwar schwächt, aber nicht völlig aufhebt. Wie Röntgen ferner zeigte, werden diese Strahlen weder regelmäßig zurückgeworfen, noch gebrochen.

Man hat diese Strahlen für Licht von sehr kurzer Wellenlänge gehalten; es ist aber nicht möglich, eine Wellenlänge der Röntgenstrahlen festzustellen. Vielmehr sprechen die Versuche dafür, daß man es bei ihnen nicht mit Wellen von bestimmter Periode, sondern nur mit ganz kurz dauernden Erschütterungen des Lichtäthers zu tun hat, die durch das Aufprallen der Kathodenstrahlteilchen mit ihrer außerordentlichen Geschwindigkeit auf die Antikathode hervorgebracht werden. Die Geschwindigkeit der Röntgenstrahlen ist von E. Marx (1905) gemessen und gleich der Lichtgeschwindigkeit gefunden worden.

Von besonderer Bedeutung ist, daß gewöhnliche photographische Trockenplatten für die Röntgenschen Strahlen empfindlich sind, so daß man die Erscheinungen dauernd fixieren kann. Da die Strahlen durch Holz und Papier fast ungehindert hindurchgehen, so kann man die Aufnahmen bei verschlossener Kassette oder auf der in schwarzes Papier gewickelten Platte selbst im beleuchteten Zimmer machen. Metallene Gegenstände, wie die in einem Holzkasten eingeschlossenen Messingstücke eines Gewichtssatzes oder die Münzen in einem verschlossenen Portemonnaie, bilden sich auf der Platte ab, indem die Strahlen durch Holz und Leder durchgehen und die empfindliche Schicht schwärzen, dagegen an den von Metall bedeckten Stellen mehr oder weniger abgehalten werden. Legt man die Hand auf den Holzdeckel der Kassette oder auf die Papierhülle, so erscheint auf der Platte, da die Strahlen durch die Weichteile leichter hindurchgehen als durch die Knochen, ein Schattenbild des Handskeletts, welches (im Positiv) die dunklen Schatten der Knochen in dem nur wenig dunklen Bilde der Hand zeigt. Ein goldener Ring scheint frei um den Finger zu schweben. Mittels kräftiger Fokusröhren und starker Entladungen eines großen Induktoriums gelingt es, nicht bloß von den Extremitäten, sondern auch vom Kopf und Rumpf Durchleuchtungsbilder auf einem Baryumplatincyanürschirm und photographische Aufnahmen zu erhalten. In der Medizin, besonders in der Chirurgie, wird von dieser Methode, das Innere des Körpers zu untersuchen, ausgedehnter Gebrauch gemacht.

**283. Radioaktive Substanzen.** Bald nach der Entdeckung Röntgens machte H. Becquerel die weitere sehr merkwürdige Entdeckung, daß Wirkungen ähnlicher Art, wie sie die Röntgenstrahlen ausüben, andauernd von allen uranhaltigen Substanzen ausgehen. G. C. Schmidt wies das gleiche von Thoriumverbindungen nach.