

JUL 17 1898

Ueber Kathodenstrahlen und Röntgenstrahlen.

Von

L. Zehnder.

Mit 7 Figuren im Text.

(Vorträge vom 18. April 1898 im naturwissenschaftlichen Ferienkursus zu Freiburg i. B.)

Meine Herren! Wenn elektrische Entladungen durch ein Gas hindurchgeschickt werden, so nimmt man dreierlei verschiedene Beobachtungen wahr, welche wir hier der Reihe nach uns recht klar vor Augen zu führen suchen. Wir denken uns einen Konduktor, eine Kugel, plötzlich mit Elektrizität hoher Spannung geladen. Das sog. elektrische Feld stellt sich in kürzester Zeit her um den Konduktor herum. Erst wenn dies geschehen ist, kann der elektrisierte Konduktor andere in seiner Nähe befindliche elektrische Körper abstossen bzw. anziehen. Zur Herstellung des elektrischen Feldes wird ein Teil der in den Konduktor hineingebrachten elektrischen Energie aufgebraucht, es strömt also in erster Linie elektrische Energie von dem Konduktor in den Aussenraum, so lange, bis das Feld hergestellt ist. Das Strömen dieser Energie dauert nur ungemein kurze Zeit. Die elektrische Energie strömt mit Lichtgeschwindigkeit; sie kann durch alle uns bekannten Medien hindurchströmen, durch Leiter und Nichtleiter, auch durch den luftleeren Raum hindurch. Wägbare Körper, also auch Gase, sind dazu nicht nötig, und wir nennen dieses Strömen elektrischer Energie auch nicht eine Gasentladung. Vielmehr beruht das Auftreten der „Influenz“- und der „Induktionswirkungen“ auf diesem Energieflusse. Wenn wir den Konduktor periodisch laden und entladen, so gehen in gleicher Periode elektrische Wellen von demselben aus in den Aussenraum. Stellt

man zwei Konduktoren einander gegenüber, lädt beide periodisch, den einen positiv, wenn der andere negativ ist, und entlädt man sie jedesmal wieder, etwa durch einen Funken, so erhält man elektrische Schwingungen, elektrische Wellenbewegungen von der Art, wie sie HERTZ entdeckt, RIGHI erweitert, MARCONI für die elektrische Fern-telegraphie verwendet hat. An diesen elektrischen Wellenbewegungen, an den Strahlen elektrischer Kraft kann man nach den epochemachenden Arbeiten von HERTZ die geradlinige Ausbreitung, die Brechung, Reflexion, Polarisation, Interferenzen u. s. w. nachweisen. Ein Teil dieser Versuche ist Ihnen am verflossenen Donnerstag von Herrn Prof. HIMSTEDT in vortrefflicher Weise demonstriert worden.

An dem elektrisierten Konduktor können wir, wenn er in Luft, in Gas sich befindet, noch weitere Vorgänge beobachten. Bringen wir mit demselben einen anderen Körper in Berührung, so wird dieser gleichnamig elektrisiert und abgestossen. Ein leichtes Pendelchen wird weggetrieben, gehoben, bleibt oben, bis seine Ladung verloren ist; erst dann fällt es wieder zurück. Stellen wir dem Konduktor einen anderen Konduktor gegenüber, welcher mit der ungleichnamigen Elektrizität geladen ist, so sucht jenes Pendelchen diesen zweiten ungleichnamig elektrisierten Konduktor zu erreichen. Gelingt ihm das, so giebt es seine elektrische Ladung ab, nimmt eine neue Ladung an, gleichnamig mit dem letzteren Konduktor, fällt dann gegen den ersteren zurück, giebt dort seine nunmehrige Ladung ab, und das Spiel beginnt von neuem. Das Pendelchen pendelt hin und her, vermittelt den Elektrizitätsaustausch der beiden ungleichnamig elektrisierten Konduktoren, wie z. B. bei dem Ihnen genügend bekannten elektrischen Glockenspiel. Analog verhält es sich bei vielen Pendeln, auch bei den zwischen zwei ungleichnamig elektrisierten Platten tanzenden Hollundermarkkugeln.

Ganz ähnliche Erscheinungen müssen bei den Gasmolekeln selber zustande kommen, auch wenn wir sie nicht sehen. Jede Substanz, alle Leiter und Nichtleiter können elektrische Ladungen aufnehmen und übertragen; wie unsere Pendelchen, so thun dies auch ihre einzelnen Molekeln. Jedoch ist die Kapazität der Molekeln begrifflicher Weise eine sehr geringe. Wir wissen, dass die Kapazität einer leitenden Kugel durch ihren Radius gemessen wird. Also ist bei gleicher Spannung, bei gleichem Potentiale die Elektrizitätsmenge, welche eine Molekel aufnimmt, eine überaus geringe, beispielsweise im Vergleich zu derjenigen einer Kugel von 1 cm Radius. Denn die Molekel hat nach Berechnungen von O. E. MEYER u. A. nur

einen Radius R von etwa einem Hundertmillionstel Centimeter. Diesem Radius ist die elektrische Ladung e , welche die Molekel von unserem betrachteten Konduktor bei der Berührung aufnimmt, proportional. Sei E die Ladung des elektrisierten kugelförmigen Konduktors, e die Ladung, R der Radius einer kleinen leitenden Hilfskugel, welche durch Berührung mit dem Konduktor ihre Ladung erhalten hat; sei x der Abstand ihres Mittelpunktes vom Konduktormittelpunkte, so ist die abstossende Kraft, welche vom Konduktor auf die gleichnamig elektrisierte Hilfskugel ausgeübt wird: $K = Ee/x^2$, wenn die Ladung e die Verteilung auf dem Konduktor nicht störend beeinflusst. Diese Kraft ist wegen des Faktors e proportional mit R . Sei m die Masse der Hilfskugel, die bei homogenem Materiale proportional mit R^3 ist, so ergibt sich aus der LAGRANGE'schen Bewegungsgleichung: $K = m \cdot d^2x/dt^2$ der Wert von K/m proportional mit $1/R^2$. Der Einfachheit halber setzen wir für den Proportionalitätsfaktor P_x , wobei wir durch den Index x andeuten wollen, dass jener Faktor die Grösse x noch enthält. Unsere Bewegungsgleichung lautet also: $d^2x/dt^2 = P_x/R^2$, und wenn wir beiderseits mit $(dx/dt) \cdot dt$ bezw. mit dx multiplizieren und integrieren, so erhalten wir: $1/2 \cdot (dx/dt)^2 = Q_x/R^2 = 1/2 \cdot v^2$, wobei Q_x eine andere Funktion von x , ferner $dx/dt = v$ die Endgeschwindigkeit der Hilfskugel bezeichnet, wenn dieselbe im Anfangspunkte der betrachteten Bewegung in Ruhe war ($v_0 = 0$ für $x = x_0$). Uns interessiert hier besonders das wichtige Resultat: Die Geschwindigkeit v , welche die Hilfskugel erhält unter dem Einflusse unserer abstossenden elektrischen Kraft, ist unter sonst gleichen Verhältnissen umgekehrt proportional ihrem Radius R . Was dies bedeutet, erkennen wir, wenn wir eine homogene Hilfskugel vom Radius $R = 1$ cm vergleichen mit einer ihrer Molekeln. Durch Berührung mit jenem elektrisierten Konduktor habe die Hilfskugel eine solche Ladung erhalten, dass sie auf einem bestimmten Wege $x - x_0$, durch welchen sie sich ohne Hindernis bewegen kann, eine Geschwindigkeit von 3 m in der Sekunde annehme. (Es ist dies noch keine sehr grosse Geschwindigkeit, etwa diejenige in einem ziemlich reissenden Flusse. Ein Körper, im luftleeren Raume aus der Ruhe um 46 cm gegen die Erde fallend, wird etwa diese Endgeschwindigkeit annehmen.) Unter sonst gleichen Umständen würde eine einzelne losgelöste Molekel der Hilfskugel auf eine $1/R$, das heisst auf eine 100 000 000mal grössere Geschwindigkeit, also auf die Geschwindigkeit von 300 000 000 m gebracht, auf dem gleichen Wege, auf welchem

die Hülfskugel nur 3 m Geschwindigkeit erhält. 300 000 000 m ist aber die Lichtgeschwindigkeit. Die elektrisierten Molekeln können demnach mit ungeheuren Geschwindigkeiten von dem betrachteten geladenen Konduktor weggeschleudert werden. Wegen der Proportionalität von r mit $1/R$ überträgt die einzelne Molekel in einer Sekunde bei ihrer enormen Geschwindigkeit in widerstandsloser Bahn die gleiche Elektrizitätsmenge, wie jene kleine Hülfskugel aus gleichem Materiale, welche ebenfalls durch die elektrischen Anziehungen und Abstossungen zwischen den beiden geladenen Konduktoren hin- und herpendelt; die Molekel allein entlädt annähernd in derselben Zeit die Konduktoren, in welcher einer von diesen vermöge der elektrischen Anziehung den anderen Konduktor zu erreichen vermag. In Wirklichkeit entladen aber viele Molekeln, oft eine ungeheure Zahl derselben, nicht bloss eine einzige; also wird die Entladungsdauer noch entsprechend kürzer.

Diese einfache Rechnung verhilft uns nun zu grösserer Klarheit über die Vorgänge, welche sich in Gasen in der Umgebung eines elektrisierten Konduktors abspielen. Seit CLAUSIUS wissen wir, dass in Gasen die betreffenden Molekeln wie elastische Kugeln in einem von Aether erfüllten Raume hin- und herzucken, aneinanderstossen und wieder zurückprallen, dass sie mit sehr grossen Geschwindigkeiten (485 m pro Sekunde im Mittel für Luft bei 0° C.) unaufhörlich von Stoss zu Stoss sich bewegen. Auch gegen feste Wände, welche den Gasraum an irgend einer Stelle begrenzen, stossen die Gasmolekeln und prallen von ihnen wie von vollkommen elastischen Wänden zurück, solange die Temperatur konstant bleibt. Eine solche die Gasmasse begrenzende Wand bildet aber die Oberfläche des von uns oben betrachteten elektrisierten Konduktors. Auf sie stossen fortwährend unzählige Gasmolekeln. Diese nehmen dabei die Elektrisierung des Konduktors an und werden mit den durchschnittlichen mittleren Geschwindigkeiten, welche ihnen sonst im Gase zukommen, von seiner Oberfläche zurückgeworfen. Sie erhalten aber dazu die oben berechnete Beschleunigung, in Folge der aufgenommenen Ladung, so dass sie, je länger sie sich frei, ohne Widerstände bewegen, um so grössere Geschwindigkeiten annehmen müssen.

Besitzt der Konduktor eine geringe Ladung und ist seine Oberfläche wirklich eine vollkommene Kugelfläche, ist auch keine andere elektrische Ladung in seiner Umgebung vorhanden, welche merkliche Störungen bewirken könnte, so werden an jeder Oberflächenstelle solche Gasmolekeln mit gleicher Kraft abgestossen. Sie fliegen gegen

andere weiter aussen befindliche Molekeln, geben diesen von ihren Ladungen ab, und fliegen wieder zurück gegen die Konduktoroberfläche hin. Diese weiter aussen befindlichen Molekeln werden nun ihrerseits vom Konduktor abgestossen, übertragen ihre Ladungen auf noch weiter entfernte Molekeln u. s. f. So wandert jede Ladung einer Molekel, vermöge der abstossenden Wirkung, welche vom Konduktor stets auf gleichnamig elektrisierte Molekeln ausgeübt wird, weiter und weiter nach aussen. Der Konduktor wird durch das Zusammenwirken aller in seiner Umgebung befindlichen Gasmolekeln allmählich entladen. „Allmählich“ ist diese Entladung; denn unter unseren Voraussetzungen ist keine Stelle an der Kugeloberfläche des Konduktors vor den anderen ausgezeichnet, und in diesem Falle muss sich nach den Gesetzen der Gastheorie Druckgleichheit an allen Stellen der Gasmasse herstellen. Da wo die Gasmolekeln grössere Geschwindigkeiten besitzen, also in der Nähe des elektrisierten Konduktors, müssen sie sich weniger dicht lagern als an Stellen geringerer Geschwindigkeit. Nur dadurch wird Druckgleichheit hergestellt. Ist dies geschehen, so wird nun der Austausch elektrischer Energie ein entsprechend geringerer. Der Konduktor verliert seine Ladung mehr oder weniger langsam, weil gleichsam ein statisches Gleichgewicht unter den Gasmolekeln zustande kommt, weil keine Konvektionsströme auftreten können.

Jener Konduktor habe nun eine starke Ladung. Auch sei seine Oberfläche nicht vollkommen glatt, so dass Hervorragungen, kleine Höcker auf derselben vorhanden sind, wie es an Oberflächen wirklicher Körper stets der Fall ist, sogar wenn sie aufs allerbeste poliert sind. Mit einem Mikroskop betrachtet, welches noch Molekeln selber erkennen liesse, würde uns die Körperoberfläche als mit lauter Höckern bzw. Spitzen besetzt erscheinen. Nun ist bekanntlich die elektrische Dichte an allen Hervorragungen und besonders an scharfen Spitzen am grössten. Giebt es also an unserem Konduktor Stellen *a* (Fig. 1), an welchen stärkere Hervorragungen sich befinden, so werden hier die Gasmolekeln mit stärkeren Ladungen versehen, als anderswo. Diese Gasmolekeln werden mit grösseren Geschwindigkeiten weggeschleudert, als die übrigen (ausgezogene Pfeile). Die zurückgetriebenen Molekeln (punktirierte Pfeile) finden hier, bei *a*, einen grösseren Widerstand gegen ihr Zurückfliegen, als anderswo; folglich suchen die zurückfliegenden Molekeln an ent-

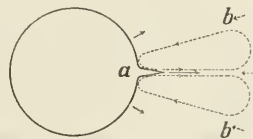


Fig. 1.

ferneren Stellen b zurückzuströmen. In dieser Weise bildet sich eine Zirkulationsbewegung im Gasraume aus; Konvektionsströme entstehen (punktierte Kurven), welche stark elektrisierte Gasmolekeln von der Spitze a nach aussen leiten. Diejenigen Molekeln dagegen, welche ihre Ladungen an andere, aussen befindliche Molekeln abgegeben haben, welche also unelektrisch geworden sind, werden bei b wieder gegen die Kugel zurückströmen. Eine solche Bewegung an Spitzen nimmt man in der That wahr. Sie ist bekannt unter dem Namen des „elektrischen Windes“.

Je stärker nun die elektrische Spannung an einem Konduktor wird, um so grösser werden die Geschwindigkeiten, mit denen die Gasmolekeln, besonders an einzelnen Stellen, an solchen unsichtbaren Spitzen, weggeschleudert werden. Die Molekeln stossen bei ihren Zusammenstössen mit Geschwindigkeiten auf einander, so gross, wie sie den höchsten Temperaturen entsprechen. Dabei werden Molekeln dissoziiert. Aus mehratomigen entstehen einatomige Molekeln, welche noch schneller sich bewegen, welche noch heftiger zusammenstossen, welche auch neue Verbindungen eingehen können. Demnach strahlen solche ein- und mehratomige Molekeln bei ihrem Aufeinanderplatzen Licht aus, sie werden leuchtend. Es entstehen Lichtblitze in denjenigen Bahnen des elektrischen Windes, in welchen die Elektrizität am energischsten nach aussen getrieben wird. Neben diesen Blitzbahnen strömen die unelektrisch gewordenen Molekeln wieder gegen den Konduktor zurück. Solche Lichtblitze kann man an dünnen blanken Drähten wahrnehmen, welche durch Induktionsströme auf hohe Spannung gebracht werden, wenn ihnen nur keine anderen Leiter nahe kommen. Besonders schön und mächtig sieht man dieselben an isolierten Polen von Teslaspulen. — Alle hier in zweiter Linie beschriebenen elektrischen Entladungsarten in Gasen nennen wir „stille Entladungen“. Gleichwohl ist der Uebergang zu den nicht stillen Entladungen schon gemacht; denn die zuletzt erwähnten Entladungen lassen bekanntlich ein deutliches „Knistern“ vernehmen.

Nun sei ein zur Erde abgeleiteter oder ein mit ungleichnamiger Elektrizität geladener gleicher Konduktor in der Nähe jenes zuerst betrachteten. Die weiteren Vorgänge sind den bis dahin beschriebenen ganz ähnlich. Die elektrische Kraft ist in diesem Falle zwischen beiden Konduktoren, von Oberfläche zu Oberfläche, am stärksten. Hier erfahren die elektrisierten Gasmolekeln den stärksten Antrieb; es entsteht ein elektrischer Wind zwischen beiden

Konduktoren. Immer heftiger wird derselbe, bis er einen gewissen Grenzwert erreicht, welcher abhängig ist von der elektrischen Potentialdifferenz, von den Konduktoren, von dem umgebenden Medium. Ist diese Potentialdifferenz gross genug, so kommt der dritte von uns ins Auge zu fassende Entladungsvorgang zustande, die „Funkenentladung“. Eine solche Funkenentladung ist der Blitz. Mit unserem Induktorium können wir den Blitz im kleinen hervorbringen; ebenso mit anderen elektrischen Apparaten, mit Elektrisiermaschinen, mit Influenzmaschinen. Sind die zugeführten Elektrizitätsmengen genügend gross, so können konstante Elektrizitätsübergänge zustande kommen, wie bei der Bogenlampe. Aber auch der kleine elektrische Funke, welcher bei der Schliessung eines einfachen galvanischen Elements entsteht, ist eine kleine Blitzentladung.

Bei solchen elektrischen Entladungen in der Luft sagt man gewöhnlich, die Luftstrecke werde vom elektrischen Funken durchschlagen, durchbrochen. Sehen wir genauer zu, wie es sich damit verhält. Nach CLAUSIUS haben die Luftmolekeln bei der Temperatur des schmelzenden Eises mittlere Geschwindigkeiten von etwa 485 m in der Sekunde. Diese Geschwindigkeit besitzen die Luftmolekeln in der Umgebung des betrachteten unelektrischen Konduktors, wenn sie seiner Oberfläche parallel fliegen oder wenn sie von aussen gegen den Konduktor heranfliegen. Mit derselben Geschwindigkeit werden sie von dem Konduktor zurückgeworfen, weil seine Oberfläche nach unserer Vorstellung die Eigenschaft der vollkommenen Elastizität den Gasmolekeln gegenüber besitzt. Ist aber der Konduktor elektrisiert, so wird diese Geschwindigkeit der nunmehr mit einer elektrischen Ladung versehenen, von ihm weggeworfenen Molekel rasch vergrössert, sie nimmt bald weit höhere Werte als 485 m an. Zwar stösst die Molekel gelegentlich auf eine andere Molekel, sie erfährt also gewissermassen einen Widerstand, von den übrigen im Raume vorhandenen Luftmolekeln herrührend. Aber nach den Stossgesetzen überträgt sie ihre Geschwindigkeit, wenigstens zum Teil, auf die gestossene Molekel. Diese erfährt nun, wegen der dabei erhaltenen Ladung, wie wir vorhin sahen, eine weitere Geschwindigkeitsvermehrung, so dass eben der elektrische Wind zustande kommt, welcher so weit nach aussen reicht, als die abstossende Wirkung jenes elektrisierten Konduktors ihren Einfluss noch merklich ausübt.

Besonders regelmässig gestalten sich diese Verhältnisse, wenn ein zweiter zur Erde abgeleiteter oder ungleichnamig elektrisierter Konduktor dem ersten in passendem Abstände gegenübersteht. Die

elektrische Kraft ist in der kürzesten Verbindungslinie beider Konduktoren am stärksten. Hier kommen die Geschwindigkeitssteigerungen, hier kommt der elektrische Wind zustande, und zwar zweifach: von jedem Konduktor aus ein elektrischer Wind gegen den anderen Konduktor hin. Die Richtungen dieser Winde stimmen dabei, wegen ihrer vorhin erwähnten Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Konduktoren, nicht genau mit einander überein. Die Winde entwickeln sich aber, wie oben beschrieben, bis die heftig bewegten Molekeln derselben einander genügend sich

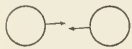


Fig. 2.

nähern, und dann kommt eine entsprechende (zackige) Funkenentladung zustande (Fig. 2). Vereinfacht werden die Verhältnisse in diesem Falle besonders dadurch, dass alle Molekeln, die in der Bahn des elektrischen Windes fliegen, elektrische Ladungen angenommen haben, gleichnamig mit demjenigen Konduktor, von welchem sie herkommen. Die entgegengesetzt fliegenden Molekeln sind demnach ungleichartig elektrisiert, sie ziehen sich an, um so mehr, je mehr sie sich einander nähern; sie fahren nicht mehr ganz zufällig, wie in unelektrischen Gasen, an einander vorbei, sondern sie stossen möglichst in zentralen Stössen auf einander, tauschen ihre Geschwindigkeiten aus, wegen ihrer gleichen Massen. Sie tauschen auch ihre Ladungen aus, wegen der Abstossung gleichnamiger Elektrizitäten von den Konduktoren her — soweit sich nicht ungleichnamige Ladungen einfach ausgleichen und die elektrische Energie in andere Energieformen, insbesondere in Licht, übergeht. Demnach wird der elektrische Wind viel rascher und viel stärker gesteigert, wenn ein zweiter Konduktor in der Nähe des ersten sich befindet. Sind dann die elektrischen Spannungen der beiden Konduktoren gross genug, werden dementsprechend die Geschwindigkeiten der zwischen ihnen hin- und herzuckenden elektrisierten Molekeln genügend gross, so verdrängen diese schliesslich die nicht elektrischen Molekeln der Nachbarschaft, welche etwa parallel den Konduktoroberflächen fliegen. Es entsteht gewissermassen eine feine Oeffnung im Gase, von Konduktor zu Konduktor: die Funkenbahn. In ihr fliegen die elektrisierten Gasmolekeln zwischen den Konduktoren hin und her, mit beschleunigten Geschwindigkeiten, bis die Funkenentladung in vollem Gange ist. Ihre Geschwindigkeiten sind nun auch an den Konduktoroberflächen selber entsprechend höhere, wegen ihrer ungleichnamigen Elektrisierung, mit welcher sie an denselben ankommen und vermöge welcher sie stets von denselben angezogen werden, bis Berührung stattgefunden hat. Dann werden sie,

wegen der Elastizität der Konduktoroberflächen für Stösse der Gasmolekeln, mit entsprechend grossen Geschwindigkeiten zurückgetrieben. Daher kommt eben eine fortwährende Steigerung der Geschwindigkeiten im elektrischen Winde zustande, bis die sichtbare Entladung selber einsetzt. Die mit den grössten Geschwindigkeiten auf die Konduktoroberflächen stossenden Gasmolekeln vermögen die Leiteroberflächen zu erhitzen, Teilchen von ihnen loszureissen, sie dampfförmig zu machen. Die PRIESTLEY'schen Figuren verdanken diesem Umstande ihre Entstehung. Selbstverständlich wird dabei ein Teil der kinetischen Energie der Gasmolekeln in solche der Metallmolekeln umgewandelt.

Die zwischen beiden Konduktoren hin- und hergejagten elektrisierten Molekeln stossen gewissermassen eine wirkliche Oeffnung, ein wirkliches Loch durch den Gasraum hindurch. Denn alle unelektrischen Gasmolekeln, welche etwa in senkrechter Richtung quer durch die Funkenbahn hindurchtreten wollen, mit ihren mittleren Geschwindigkeiten von nur etwa 485 m in der Sekunde, kommen nicht weit in diese Bahn hinein. Wegen der ungeheuren Geschwindigkeiten der in der Funkenbahn fliegenden Molekeln stossen sie bald auf eine der letzteren, und werden von ihr mit grosser Gewalt, der betreffenden Geschwindigkeit entsprechend, zur Seite geschleudert. So bleibt eine innerste Bahn, die eigentliche Funkenbahn, ganz frei für die von Konduktor zu Konduktor fliegenden Molekeln. Sie wird umhüllt von einer Zone, von der „Aureole“, in welcher Zusammenstösse solcher elektrisierter mit nicht elektrisierten von der Seite her eintretenden Molekeln stattfinden. Diese Zone endlich ist umgeben von einem Raume, in welchem der Zustand des Gases fast derselbe ist, wie wenn keine Funkenentladung stattfände. Die Molekulargeschwindigkeiten in diesem Raume sind von der Aureole nach aussen abnehmend noch etwas grössere, die Temperatur ist eine höhere, die Gasdichte eine etwas geringere, als ohne Funkenentladung; auch kommen darin noch vereinzelte stärker geladene Molekeln vor. Schlägt der elektrische Funke durch einen festen Körper hindurch, so reisst er ganz analog eine Oeffnung, ein Loch in diesen Körper. Solche Löcher in durchschlagenen Glasplatten sind Ihnen bekannt genug. Ich erinnere auch an die Blitzröhren, welche der Blitz erzeugt, wenn er in Sanddünen einschlägt, durch Schmelzen der seine Funkenbahn einhüllenden schmelzbaren Substanzen.

Aus unserer Erklärung des Zustandekommens einer Funkenentladung geht hervor, dass vom Augenblicke des Herstellens einer

elektrischen Spannungsdifferenz zwischen zwei Konduktoren bis zum Eintritte der Funkenentladung eine gewisse Zeit verstreichen muss. Es entstehen elektrische Winde, dieselben werden grösser und grösser, so lange, bis die nicht geladenen Gasmolekeln von den geladenen genügend zur Seite geschleudert werden. Dadurch wird erst die Funkenbahn frei und der Funke selber kommt zustande, das heisst: eine Molekelschaar, welche mit ungeheuren Geschwindigkeiten zwischen den Konduktoren hin- und herzuckt, vermittelt die Entladung derselben. In dieser nunmehr von äusseren Widerständen freigewordenen Bahn, in der Funkenbahn, können die Geschwindigkeiten der Gasmolekeln sich so sehr steigern, dass sie der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar werden, wie wir vorhin berechnet haben.

Es ist merkwürdig, dass diese interessante Erscheinung der Verzögerung der Funkenentladung bisher fast unbeachtet geblieben ist. Erst in neuester Zeit ist die Aufmerksamkeit weiterer Kreise auf die Erscheinung gelenkt worden, durch Versuche von JAUMANN im Jahre 1895, von WARBURG in den Jahren 1896 und 1897. Diese Verzögerung kann Sekunden, sie kann Minuten betragen, und es ist sichergestellt, dass es sich bei den betreffenden Versuchen nicht etwa um zufällige Spannungssteigerungen in den Konduktoren handelt, durch welche die Entladungen erst nachträglich noch eingeleitet werden, sondern dass nur die Zeit selber massgebend ist. Eine niedrige Spannung, welche eine entsprechende Zeitdauer anhält, kann in einer bestimmten Luftstrecke einen Funken zustande bringen, während eine wesentlich höhere, aber kürzere Zeit dauernde Spannung keinen Funken in ihr entstehen lässt.

Wie wir aus Erfahrung wissen, ist die Bahn des Funkens eine sehr enge. Der Blitz erscheint oft als feine Linie. Es sind also verhältnismässig wenige Molekeln imstande, die Entladung zu bewirken. Dies ist dadurch zu erklären, dass die anfänglichen Geschwindigkeiten der Molekeln in der Funkenbahn, wie wir gesehen haben, immer mehr gesteigert werden. Denn bei jedem Aufprallen auf die Konduktoroberfläche werden die Molekeln annähernd mit ihrer eigenen Geschwindigkeit zurückgeworfen. Während des Freifliegens zwischen beiden Konduktoren aber werden sie, auch wenn sie inzwischen auf andere geladene Molekeln gestossen sind, doch wegen ihrer jeweiligen Ladungen immer noch mehr beschleunigt. Freilich sind dafür die Elektrizitätsmengen, welche mit jeder Molekel übertragen werden, verhältnismässig gering. Sie sind proportional dem Radius der Molekeln, diese als Kugeln gedacht.

Nun ist klar, dass das Abspumpen der Luft aus dem Raume, in welchem die Entladung zustande kommen soll, die Bildung der Funkenbahn und also der Entladung selber vorerst begünstigt. Denn die unelektrischen Molekeln werden von der Pumpe weggeschafft, diejenigen nämlich, welche die Funkenbahn einhüllen, welche die Funkenbahn immer wieder zu zerstören bestrebt sind. Die Molekeln dagegen, welche die Entladung vermitteln, können durch Abspumpen nicht entfernt werden, weil sie elektrisiert sind, weil sie nicht diffus aus einander weichen, wie im normalen Gase, sondern nur von einem Konduktor zum anderen hin- und herzucken. Denn sie werden stets von einem der beiden Konduktoren, von einer der beiden Elektroden angezogen. In einem Gase von Atmosphärendruck, in Luft, geht der Funke des Induktoriums wie ein Blitz über, in feiner Linie, so auch in dem „elektrischen Ei“. Pumpen wir aber die Luft in diesen Glasgefäße aus, vermittels einer einfachen Wasserluftpumpe, so sehen Sie, wie die Funkenbahn immer dicker und dicker wird. Die anfänglich feinste weisse Lichtlinie geht in einen rosafarbenen Faden, dann in einen rosafarbenen Strang über, welcher immer breiter wird, je weiter wir auspumpen. Immer weiter kann man die Elektroden im elektrischen Ei von einander entfernen, ohne dadurch den Entladungsvorgang unmöglich zu machen. Immer leichter kommt die Entladung zustande, je weiter wir die Luft auspumpen. Immer geringer wird die für eine Entladung notwendige Potentialdifferenz — weil eben der elektrische Wind, welcher die Entladung einleiten muss, um so leichter zwischen den beiden Elektroden sich herstellt, je weniger dicht die Luft ist, je weniger Gasmolekeln sich im betreffenden Raume befinden — bis zu einer gewissen Grenze, auf die wir sogleich zu sprechen kommen werden.

Wollen wir das Gefäß, in welchem die Entladung vor sich geht, noch besser auspumpen, so müssen wir eine Quecksilberluftpumpe anwenden. Ich habe hier ein rundes Glasgefäß mit zwei Elektroden, durch welche die elektrischen Ströme in das Gefäß hineingeleitet werden, an die Quecksilberluftpumpe angeschmolzen, um die Luft aus demselben absaugen zu können. (Die Pumpe ist von KAHLBAUM konstruiert, von C. KRAMER in Freiburg i. B. hergestellt, eine SPRENGEL'sche Pumpe, bei welcher das durch das SPRENGEL'sche Fallrohr herabgesunkene Quecksilber automatisch wieder gehoben wird, mittels einer Wasserluftpumpe. Um das Quecksilber höher als 76 cm heben zu können, was bei dieser Pumpe notwendig ist, wird durch eine feine Oeffnung Luft in die steigende Queck-

silbersäule eingelassen, so dass im Steigrohre Quecksilbersäulen und Luftsäulen mit einander alternieren. Die im Steigrohre mitgenommene aufsteigende Luft muss durch die Wasserluftpumpe rasch genug entfernt werden.) Pumpen wir nun jenes Glasgefäss aus, so erkennen Sie, wie der anfängliche rote Strang zwischen den beiden Elektroden immer breiter wird. Immer kleinere elektrische Spannungen genügen, um solche Entladungen in den ausgepumpten Röhren einzuleiten und zu unterhalten, bis der Gasdruck im Inneren der Röhre gleich demjenigen einer Quecksilbersäule von etwa 1 bis $\frac{1}{2}$ mm Höhe geworden ist. Bis zu diesem Drucke waren nämlich immer noch so viele Gasmolekeln im Raume vorhanden, dass die Entladung durch dieselben in genügender Weise vermittelt werden konnte, und jedes Auspumpen der Luft verminderte insbesondere den Widerstand der nicht an der Entladung beteiligten Molekeln, so dass die Funkenbahn sich breiter und breiter entwickeln konnte. Wird nun aber noch weiter ausgepumpt, so werden auch der Molekeln, welche die Entladung selber besorgen, immer weniger. Denn in den verhältnismässig sehr langen Ruhepausen zwischen den einzelnen Entladungen unseres Induktoriums werden die Gasmolekeln unelektrisch, verteilen sich nach allen Richtungen hin diffus, und ein Teil derselben gelangt in die Pumpe, geht für den Entladungsvorgang bleibend verloren. Nach dem Auspumpen aller Luft bleibt selbstverständlich der von uns oben beschriebene Entladungsvorgang vollständig weg; im vollkommensten Vakuum ist eine elektrische Gasentladung nicht mehr möglich. Folglich muss für die elektrische Entladung ein gewisses Optimum des Gasdrucks existieren, bei welchem die Entladung am leichtesten zustande kommt. Bei diesem Drucke ist noch eine genügende Zahl von Molekeln vorhanden, um die Entladung vollständig sich entwickeln zu lassen, aber doch sind nunmehr so wenige Molekeln da, dass der Luftkanal der Funkenstrecke nicht zu sehr beeinträchtigt wird. Die Folge davon ist die sehr leichte Herstellung des elektrischen Windes, welcher der Entladung vorhergehen, welcher sie einleiten muss.

Die Entladungen in Gasen zeigen bekanntlich an den beiden ungleichnamigen Elektroden charakteristische Unterschiede, auf welche wir näher eingehen wollen. Schon unter Atmosphärendruck erkennt man an der negativen Elektrode, der Kathode, unter günstigen Verhältnissen einen violetten Punkt; an der positiven Elektrode, der Anode, ist das Licht rötlich. Dieselben Färbungen erkennen Sie weit besser in einer ausgepumpten Röhre, durch welche einseitig

gerichtete Entladungen, hier diejenigen einer Influenzmaschine, geschickt werden. Noch schöner und insbesondere ruhiger tritt die Erscheinung hervor bei der konstanten Entladung eines Hochspannungsakkumulators durch eine solche Geissleröhre. (Uebrigens sind in anderen Gasen als Luft oder Stickstoff die Färbungen an den Elektroden andere als die soeben angegebenen.) Sieht man genauer zu, so nimmt man an der Kathode im violetten Lichte Schichtungen wahr, wenn der Druck ein passender ist. An der Kathodenoberfläche selber erkennt man eine helleuchtende Schicht. Unmittelbar umgeben ist diese von einer dunkleren Schicht, diese von einer hellen, dann folgt wieder eine breitere dunkle, nochmals eine breitere helle Schicht, dann ein dunkler Raum, welcher das Kathodenlicht abschliesst und an welchen auf der Anodenseite das Anodenlicht grenzt. Alle diese Schichtungen des Kathodenlichtes verlaufen annähernd konzentrisch mit einem Teil der Kathodenoberfläche, wenn wir auch in dem Falle uns so ausdrücken dürfen, dass die Kathode nicht eine Kugel ist. In anderer Ausdrucksweise können wir sagen: die Kathode verhält sich ähnlich wie ein mit negativer Elektrizität hoher Spannung statisch geladener Leiter, welcher im Inneren der ausgepumpten Röhre Niveauflächen erzeugt, womit indessen nicht gesagt sein soll, dass die soeben erwähnten Schichten wirkliche Niveauflächen seien.

Nach unserer Auffassung der Gasentladungen definieren wir nun die besprochenen hellen Schichten des Kathodenlichtes als diejenigen Orte, an welchen die in entgegengesetzten Richtungen fliegenden mit entgegengesetzten Ladungen versehenen Molekeln aufeinanderstossen. Die Stösse sind so heftige, dass die Molekeln infolgedessen Licht ausstrahlen. Alle Gasmolekeln des betrachteten Raumes treffen früher oder später auf die Kathode. Von dieser werden aber insbesondere diejenigen Molekeln, welche direkt oder indirekt von der Anode positive Elektrizität aufgenommen haben, immer stärker angezogen, je näher sie herankommen, bis sie schliesslich die Kathodenoberfläche erreichen. Mit zunehmenden Geschwindigkeiten haben sie sich gegen die Kathode bewegt; nun schlagen sie auf, sie werden an dieser Oberfläche durch den heftigen Stoss in denjenigen eigenen Schwingungszustand versetzt, welcher zur Lichtausstrahlung Veranlassung giebt, sie lassen demnach die Kathodenoberfläche leuchtend erscheinen. Auch erhitzen sie durch ihr Aufschlagen die Kathode selber, so dass diese in vielen Fällen glühend wird. Platinkathoden zerstäuben infolge dieses Glühens so stark, dass sie Platinteilchen

abschleudern, dass alle umliegenden Glasteile der Röhre mit einem Platinspiegel sich überziehen. In dieser Weise entsteht das Helleuchten an der Kathodenoberfläche selber.

Die Molekeln, welche mit der Kathode zur Berührung gekommen sind, haben die Elektrisierung derselben angenommen. Bei ihrer Ankunft an der Kathode besaßen sie gewisse mittlere Geschwindigkeiten, welche beim Zurückprallen nicht ihrer Richtung, wohl aber ihrem numerischen Werte nach gleich bleiben. Nun werden sie aber vermöge ihrer gleichnamigen elektrischen Ladung abgestossen, ihre fortschreitende Geschwindigkeit nimmt zu; sie fliegen möglichst längs der elektrischen Kraftlinien, also normal zu den Niveauflächen von der Kathode weg, bis sie andere Molekeln treffen. In der kinetischen Gastheorie ist berechnet worden, dass zu einer gewissen mittleren Geschwindigkeit bestimmter Gasmolekeln in einem Raume von bestimmter Gasdichte eine bestimmte mittlere molekulare Weglänge dieser Molekeln zwischen zwei Zusammenstößen die wahrscheinlichste ist. So gehört auch hier zu den diesen elektrisch geladenen Molekeln zukommenden mittleren Geschwindigkeiten eine gewisse mittlere molekulare Weglänge in dem Gasraume um die Kathode herum. Diese Geschwindigkeiten unserer elektrisierten Gasmolekeln sind aber, wie wir gesehen haben, in der Regel bei elektrischen Gasentladungen ungemein viel grössere, als diejenigen unelektrischer Gasmolekeln. Dementsprechend sind die molekularen Weglängen grössere. In demjenigen Abstände von der Kathodenoberfläche, welcher ungefähr der mittleren zu unseren Verhältnissen gehörigen molekularen Weglänge entspricht, entsteht die nächste, die zweite helleuchtende Schicht. Die Zusammenstöße der Molekeln sind, wegen ihrer ungleichnamigen Ladungen, vorzugsweise zentrale. Daher fliegen von der zweiten helleuchtenden Schicht neue Molekeln mit den aufgenommenen negativen Ladungen neuerdings normal zu den Niveauflächen nach aussen. Ihre Anfangsgeschwindigkeiten sind gleich den Endgeschwindigkeiten der Molekeln, welche direkt von der Kathode herkamen. Diese Anfangsgeschwindigkeiten werden durch die elektrische Abstossung der Kathode noch vergrössert. Demnach sind die mittleren Geschwindigkeiten dieser Molekeln grösser als diejenigen der vorhin betrachteten, und ihre molekularen Weglängen müssen gleichfalls entsprechend grösser sein. Somit entsteht die dritte helleuchtende Schicht des Kathodenlichtes in grösserem Abstände von der zweiten Schicht, als diese von der ersten Schicht (an der Kathodenoberfläche selber). Eine vierte helleuchtende Schicht

des Kathodenlichtes würde einen noch grösseren Abstand von der dritten Schicht besitzen u. s. f. Diese hellen Schichten sind aber nicht scharf begrenzte Flächen, sondern sie zeigen nur Maxima helleren Leuchtens, weil in der Regel jede andere Molekel auch eine andere molekulare Weglänge von Stoss zu Stoss zurücklegt. Die Wahrscheinlichkeit ist nur die grösste, dass gerade die berechnete mittlere molekulare Weglänge von derselben zurückgelegt werde. Aber alle anderen Weglängen kommen gelegentlich vor.

Das Anodenlicht hat zwar einige Aehnlichkeiten mit dem Kathodenlichte, aber auch wieder manche Verschiedenheiten. Im Anodenlichte erkennen wir unter Umständen gleichfalls Schichtungen, helle und dunkle Flächen, welche wegen ihrer Krümmungen an Niveauflächen erinnern. Dieselben entstehen, wie in der Ihnen hier vorgewiesenen Entladungsröhre, besonders dann leicht, wenn das Gas in der Röhre durch geringste Mengen, durch Spuren organischer Körper, durch Terpentinöl, Aether, Alkohol, durch Phosphor, verunreinigt ist. Im Anodenlichte erscheinen gelegentlich zahlreiche Schichten bei grösserer Länge der Entladungsröhre. Diese Schichten sind in der Regel ziemlich äquidistant. Es kommt dies, wie mir scheint, davon her, dass die positive Elektrizität sich der inneren Glasoberfläche der Entladungsröhre, welche durch die Wirkung der Entladungen erhitzt wird, leichter mittheilt, als die negative, und dass darnach das elektrische Feld in der Umgebung der Anode entsprechend modifiziert wird. Denn erwärmtes Glas ist nach WARBURG's interessanten Versuchen gut leitend. Nimmt die Glasoberfläche in der Umgebung der Anode ein ähnliches hohes Potential an, wie die Anode selber, so erhalten die Molekeln, welche von der Kathode gegen die Anode fliegen und in diesen Raum eindringen, in ihm keine weiteren Beschleunigungen mehr. Sie werden in ihm gleiche mittlere molekulare Weglängen bewahren und also äquidistante Schichten bilden. Sie werden nicht mit ebenso grosser Gewalt und nicht in so grosser Zahl gegen die Anode geschleudert, wie die Molekeln des Kathodenlichts gegen die Kathode, weshalb auch die Anode nicht auf so hohe, nicht auf Glühtemperatur gebracht wird.

Die Molekeln, welche das positive, das Anodenlicht entstehen lassen, sind aller Wahrscheinlichkeit nach Gasmolekeln. Am Anfange jeder Entladung stürzen solche elektrisierte Gasmolekeln auch auf die Kathode. Dadurch wird die Kathodenoberfläche erhitzt, so stark, dass sie ihre eigenen Metallmolekeln in Dampfform übergehen lässt und geladen fortschleudert, wie durch die Platinzerstäubung

klar gezeigt wird. Man sieht leicht ein, dass die Kathodenoberfläche während jeder Entladung in der That ungemein erhitzt werden muss; denn werden Entladungen eines Induktoriums durch eine Geissleröhre mit dünner Platinkathode geschickt, so kann diese dauernd glühen, obwohl die Dauer einer einzelnen Entladung vielleicht nur den tausendsten Teil der Ruhepause von einer Entladung zur nächstfolgenden ausmacht, vielleicht noch bedeutend weniger. Viele von den weggeschleuderten Platinmolekeln oder -Molekelaggregaten der Kathode brennen sich in die Glasröhrenwandung ein, sie bilden dort den bekannten Platinspiegel.

Sehr interessant ist es nun, die Schichten des positiven und insbesondere diejenigen des negativen Lichtes bei stärkerem Auspumpen zu verfolgen. Mit der stärkeren Luftverdünnung werden die molekularen Weglängen grössere, es werden die Abstände der Schichten weiter und weiter (wie Sie hier leicht beobachten können), sowohl diejenigen der positiven Schichten, als besonders diejenigen der negativen Schichten. Das Kathodenlicht breitet sich mehr und mehr aus, drängt das positive Licht mit seinen Schichten zurück. Zuletzt verschwindet das Anodenlicht fast ganz, das Kathodenlicht erfüllt die ganze Entladungsröhre. So sehr breitet sich das Kathodenlicht aus, dass zuerst seine äussere, dann seine innere helleuchtende Schicht, welche beim Beginn unseres Versuchs in unmittelbarer Nachbarschaft der Kathodenoberfläche sich befand, nun bis an die Röhrenwandungen vorgerückt ist. Von dem mattbläulichen Kathodenlichte selber bleibt zuletzt gar nichts mehr im Inneren der Röhre übrig, weil jetzt in der Regel die geladenen Metalldampfmolekeln, unseren Entwicklungen gemäss, zwischen der Kathodenoberfläche und der Röhrenwand hin- und herzucken. In dieser schliesslichen Form der elektrischen Gasentladungen, welche bei starken Luftverdünnungen erreicht wird, sprechen wir nicht mehr von Kathodenlicht, sondern von Kathodenstrahlen, wegen verschiedener merkwürdiger Eigenschaften derselben, auf welche wir näher eingehen wollen. Genau genommen sind schon bei dem ersten Aufleuchten eines violetten Punktes an der Kathode, bei den Entladungen unter Luftdruck, Kathodenstrahlen von entsprechend geringer Länge vorhanden.

Nach unseren Entwicklungen sind die wichtigeren Eigenschaften der Kathodenstrahlen einfach zu erklären: Die Kathodenstrahlen erhitzen die Kathodenoberfläche, aber auch die innere Oberfläche der Entladungsröhre, und überhaupt jede Wandung, auf welche sie

mit genügender Intensität treffen, weil die geladenen Metalldampf-
molekeln derselben mit um so grösseren Geschwindigkeiten hin- und
hergeworfen werden, je geringer der Gasdruck in der Röhre ist. Sie
sehen, wie in dieser HITTORF'schen Röhre mit Hohlkathode ein von
den Kathodenstrahlen getroffenes Platinblech zum Glühen gebracht
wird. Nehmen wir aber alles Gas aus der Röhre weg, mit Hilfe
einer Quecksilberluftpumpe, so bleiben zuletzt keine Gasmolekeln
mehr übrig, welche vermöge ihres heftigen Aufschlagens auf die
Kathode eine passende Anzahl von Metallmolekeln verdampfen und
damit die regelmässige elektrische Entladung einleiten könnten. Es
giebt also einen günstigsten (sehr geringen) Druck, ein Optimum
des Drucks, bei welchem die Kathodenstrahlen intensivste Wirkungen
ausüben; denn bei den elektrischen Gasentladungen unter höheren
Drucken, z. B. bei dem Optimum des Drucks für geringe Entladungs-
potentialdifferenz (S. 12) sind die Wirkungen der Kathodenstrahlen
noch fast unmerklich, im absoluten Vakuum sind sie gleich Null.

Die Kathodenstrahlen erhitzen nicht nur die Wandungen, auf
welche sie treffen, sondern sie bringen auch Substanzen zum Fluores-
cieren. In dieser Röhre werden ausser den Röhrenwandungen auch
noch verschiedene kristallinische Substanzen den Kathodenstrahlen
ausgesetzt. Sie sehen, dass jede von diesen Substanzen in einem
anderen, ihr eigentümlichen Lichte leuchtet, dass sie fluoresciert.
Durch die heftig auf die Oberfläche der Substanzen schlagenden
elektrisierten Metalldampf-
molekeln werden nämlich die von ihnen
getroffenen Molekeln in ihre Eigenschwingungen versetzt; ihre Atome
schwingen, der an sie gebundene Aether schwingt. Die Molekeln
strahlen infolgedessen ihr Eigenlicht aus, das Fluorescenzlicht. An
der Veränderung dieses Lichtes beim Auspumpen der Röhre können
wir erkennen, dass ein gewisser günstigster Druck die Kathoden-
strahlen am stärksten zur Geltung kommen lässt.

Die Kathodenstrahlen werfen scharfe Schatten von Körpern,
welche in ihren Weg gebracht werden. Die hinter dem Körper,
hier in dieser Röhre hinter dem Kreuz befindlichen Teile der Glas-
oberfläche werden von keinen elektrisierten Metalldampf-
molekeln ge-
troffen, sie können nicht fluorescieren. Elektrische Kraftlinien,
welche von der Kathode ausgehen und längs welchen die geladenen
Molekeln zu fliegen suchen, begrenzen annähernd das Schattenbild
auf der Röhrenwandung. Stark erhitze Körper senden aber das
sog. Fluorescenzlicht nicht mehr aus. Je mehr also die Glasoberfläche
erhitzt wird, durch andauernde Bestrahlung mit Kathodenstrahlen, um

so mehr verliert sie die Eigenschaft, Fluoreszenzlicht auszustrahlen. Sie scheint zu ermüden. Deshalb wird jetzt, wenn ich das Hindernis, das um ein Scharnier drehbare Kreuz, wegnehme, die vorher nicht bestrahlte Fläche heller als die von Anfang an bestrahlte leuchten. Wir erhalten das helle Kreuz auf dem dunkleren Grunde, der zuerst beobachteten Erscheinung gerade entgegengesetzt.

Die Kathodenstrahlen können die Körper wenigstens in dünnen Schichten chemisch verändern; ich erinnere an die Einwirkungen derselben auf photographische Trockenplatten, auf andere leicht zersetzliche Substanzen, wenn solche jenen Strahlen unmittelbar ausgesetzt werden (neuere Versuche von LEONARD, WARBURG, GOLDSTEIN). Dass die heftig aufschlagenden Metalldampfmolekeln der Kathodenstrahlen in anderen von ihnen getroffenen Molekeln Affinitätsänderungen hervorzurufen, also unter Umständen chemische Wirkungen in ihnen hervorzubringen imstande sein müssen, ist wohl selbstverständlich.

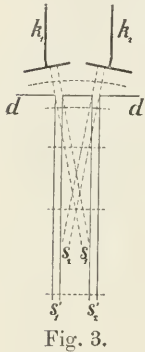


Fig. 3.

Als besonders merkwürdige Erscheinung ist die von GOLDSTEIN entdeckte gegenseitige Abstoßung zweier Kathodenstrahlen betrachtet worden, welche Sie hier beobachten, wenn eine Entladungsröhre zwei Kathoden k_1 und k_2 besitzt (Fig. 3), von welchen, durch ein Diaphragma dd abgesondert, schmale Kathodenstrahlenbündel ausgehen. Wird nur k_1 als Kathode an die Elektrizitätsquelle angeschlossen, so erhält man das Kathodenstrahlenbündel s_1 ; mit k_2 erhält man entsprechend s_2 . Beide Kathoden gleichzeitig angeschlossen lassen aber das Strahlenpaar $s_1' s_2'$ erkennen. Diese Erscheinung ist erst in den letzten Monaten ganz aufgeklärt worden. Es haben insbesondere KAUFMANN und ASCHKINASS gezeigt, dass diese vermeintliche Abstoßung auf die Aenderung des elektrischen Feldes, in welchem die Kathodenstrahlen entstehen, zurückgeführt werden muss. Die geladenen Molekeln fliegen, unseren Entwicklungen gemäss, möglichst in den Richtungen der elektrischen Kraftlinien, senkrecht zu den Niveauflächen, also senkrecht zur Kathodenfläche von ihr weg, wenn nur eine Kathode (k_1 oder k_2) der Röhre vorhanden ist (s_1 bzw. s_2). Aendert man die Niveauflächen dadurch, dass, wie hier, zwei Kathoden nebeneinander, statt nur einer einzigen, in Funktion treten, so verlaufen die Kathodenstrahlen, die geladenen Metalldampfmolekeln anders, nämlich nahezu parallel, aber eher divergent als konvergent (s_1' bzw. s_2'), den neuen in die Figur eingezeichneten Niveauflächen entsprechend.

Stellt man zahlreiche schräge Kathoden neben einander, bildet eine hohle Fläche aus ihnen, und zeichnet man nun die Niveauflächen ein, so scheint das zugehörige System der Kraftlinien annähernd aus Erzeugenden einschaliger Hyperboloide zu bestehen und also in eine kleinere Brennfläche, in einen „Brennpunkt“ f , zusammenzulaufen (Fig. 4). Dementsprechend wird hier die Wirkung der Kathodenstrahlen eine besonders intensive, wie wir vorhin bei dem Versuche über die Wärmewirkungen der Kathodenstrahlen schon gesehen haben. Solche Hittorfröhren finden in neuerer Zeit vielfach Verwendung, wenn kräftige Wirkungen der Kathodenstrahlen verlangt werden.

Die Lage der Anode beeinflusst den Verlauf der Kathodenstrahlen in stark ausgepumpten Röhren nur wenig, weil offenbar, wie ich früher schon erwähnt habe, die positive Elektrizität aus der Anode besonders leicht auf die erwärmten Glaswandungen überströmt. Es geschieht dies um so leichter, je mehr die Röhrenwandungen durch intensive Kathodenstrahlen erhitzt werden. Diese Vorstellung scheint eine auffallende Bestätigung zu erfahren in dem Ihnen Allen bekannten merkwürdigen Herunkriechen oder Flackern des durch Kathodenstrahlen erzeugten Fluoreszenzlichtes. Denn die Kathodenstrahlen entladen dort die grössten Elektrizitätsmengen, wo am meisten positive Elektrizität aus der Anode auf die Glasoberfläche übergeströmt ist, und dort wird folglich die Fluoreszenz des Glases, wegen der zahlreichen aufschlagenden Metalldampfmolekeln, momentan eine hellere. Die nächstfolgende Entladung findet aber schon andere Verhältnisse bezüglich der Ladungen der Glasoberfläche vor. Von der vorhergehenden Entladung sind Rückstände geblieben, welche die stärkere positive Ladung nun an einer anderen Stelle der inneren Röhrenoberfläche entstehen lassen, und jetzt fluoresciert diese Stelle heller als die frühere. So wechselt die Hauptentladungsstelle der Kathodenstrahlen fortwährend ihren Ort, wenn im übrigen die Entladungsbedingungen für verschiedene Stellen der inneren Röhrenwand ganz gleiche sind. Die durch die Kathodenstrahlen hervorbrachte Erwärmung der Glasoberfläche wirkt dagegen auf möglichste Beibehaltung einer einmal eingehaltenen Entladungsstelle der Röhrenwand hin. So kämpfen verschiedene Einflüsse gegen einander; im einen Falle überwiegt die eine, im anderen die andere Wirkung.



Fig. 4.

Der Verlauf der elektrischen Kraftlinien kann durch den Magnet stark beeinflusst werden. Die entsprechende magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen durch den Magnet ist bekannt genug; Sie erkennen die kräftige Wirkung des Magnets auf die Kathodenstrahlen dieser GOLDSTEIN'schen Röhre. Dass auch elektrostatische äussere Wirkungen die Kathodenstrahlen abzulenken vermögen, ist früher von HERTZ vergeblich gesucht, erst in allerneuester Zeit insbesondere von EBERT vermittels einer BRAUN'schen Entladungsröhre gefunden worden. Diese magnetischen und elektrostatischen Einwirkungen auf die Kathodenstrahlen verstehen sich zwar, nach unseren grundlegenden Entwicklungen, nunmehr von selbst. Denn durch solche Einflüsse werden die elektrischen Kraftlinien, welchen die geladenen Metalldampfmolekeln zu folgen versuchen, entsprechend geändert. Indessen müssen wir doch noch einige speziellere Bemerkungen an diese wichtigen Versuche anschliessen:

Die elektrisch geladenen Metalldampfmolekeln gehen von der Kathode aus möglichst in der Richtung der elektrischen Kraftlinien ab; sie erreichen rasch sehr grosse Geschwindigkeiten, wie wir bei Beginn unseres Vortrags ausgerechnet haben, Geschwindigkeiten, welche schliesslich sogar mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar werden. Deshalb können sie, weil sie doch Masse und Trägheit besitzen, um so weniger genau die Bahnen sehr stark gekrümmter elektrischer Kraftlinien einhalten, je schneller sie sich bewegen. Sie suchen sich also nur den elektrischen Kraftlinien anzuschmiegen, so weit es ihre grossen Geschwindigkeiten erlauben. Deshalb lenkt auch der Magnet die Kathodenstrahlen nur ab, er kann sie nicht zwingen, sich genau den abgelenkten elektrischen Kraftlinien anzupassen.

Sind nicht nur gleichartige gleichgrosse Metalldampfmolekeln in den Kathodenstrahlen in Bewegung, sondern auch Molekelaggregate, welche sich wegen der Plötzlichkeit des Entladungsvorgangs von der Kathodenoberfläche gleichfalls losgerissen haben, so erhalten letztere ihrer Grösse entsprechend geringere Geschwindigkeiten, als erstere, wie aus unserer anfänglichen Rechnung hervorgeht. Die Molekelaggregate können sich demnach den abgelenkten elektrischen Kraftlinien um so besser anschmiegen. Sondert man von den Kathodenstrahlen durch Diaphragmen ein rundes zylindrisches dünnes Bündel ab, welches auf eine fluorescierende Fläche trifft, so entsteht auf dieser durch die einfachen Metalldampfmolekeln ein heller, scharf begrenzter, runder Fleck, ferner durch die grösseren Molekelaggre-

gate, welche den divergierenden elektrischen Kraftlinien besser sich anschmiegen, um den Fleck herum ein Hof (Fig. 5). Lenkt man nun das dünne Kathodenstrahlenbündel ab, etwa mittels eines Magnets, so werden die einfachen Molekeln wegen ihrer grösseren Geschwindigkeiten weniger abgelenkt, als die schwereren und langsameren Molekelaggregate. Es entsteht ein in die Länge gezogener, elliptischer, heller Fluoreszenzfleck mit seitlich stärker abgelenktem Hofe, bezw. ein mit Schweif versehener Fleck (Fig. 5), wie solche Flecke in LEXARD's schönen Untersuchungen über die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen vielfach zur Erscheinung gekommen sind. (WIED. Ann. 52, Taf. I, 1894.) LEXARD nennt diese Erscheinung des durch Kathodenstrahlen erzeugten und magnetisch auseinandergezogenen Fluoreszenzflecks ein „magnetisches Spektrum“. Er spricht von Kathodenstrahlen verschiedener Ablenkbarkeit und glaubt, dass die Kathodenstrahlen „Vorgänge im Aether“

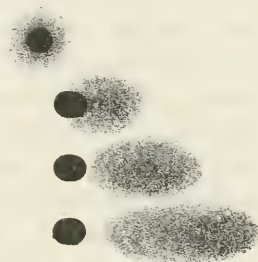


Fig. 5.

sein. Wir sehen hier, dass zur Deutung der Erscheinung seines Kathodenstrahlenspektrums unsere Theorie mittels elektrisch geladener Metalldampfmolekeln einen sehr einfachen Aufschluss giebt, ohne dass man mit LEXARD nötig hätte, die Kathodenstrahlen als Vorgänge im Aether zu bezeichnen.

Wegen des grossen Einflusses, welchen die LEXARD'schen Anschauungen über die Natur der Kathodenstrahlen auf die neueren Forscher ausgeübt haben, müssen wir auf seine interessanten Versuche etwas näher eingehen. Offenbar von der Ansicht geleitet, dass die Kathodenstrahlen möglicherweise ultraviolette Licht sehr kleiner Wellenlänge sein könnten, hat LEXARD versucht, die Kathodenstrahlen aus der Röhre, in welcher sie entstehen, durch ein passendes „Fenster“, etwa durch Quarz, in den Aussenraum herauszuholen. Er schreibt nämlich selber darüber folgendes (WIED. Ann. 51, S. 226 Anm., 1894): „Eine Entladungsröhre mit durchlässigem Verschluss herzustellen, hatte ich schon vor längerer Zeit versucht, freilich ohne Erfolg; eine millimeterdicke Quarzplatte war verwandt. Zur Benutzung der Blattmetalle wurde ich von Prof. HERTZ selbst aufgefordert“ u. s. f. HERTZ hatte also ohne Zweifel ähnliche Vorstellungen über die Natur der Kathodenstrahlen sich gebildet, wie LEXARD. Dieser Forscher brachte nun in seiner Entladungsröhre eine feine Oeffnung von etwa 2 mm Durchmesser an, bedeckte die-

selbe mit dünnem Blattaluminium, welches vollständig luftdicht war, und verkittete dieses „Fensterchen“ in genügender Weise. Mittels dieser Vorrichtung gelang es ihm in der That, Kathodenstrahlen im Aussenraume der Röhre zu erhalten und manche Erscheinungen an denselben viel genauer zu studieren, als es bis dahin im Röhreninneren möglich gewesen war. Das interessanteste Ergebnis schien aber wohl zu sein, dass nun der Aussenraum seiner Entladungsröhre, in welchen die Kathodenstrahlen „durch das Fensterchen austraten“, vollständig luftleer gemacht werden konnte, ohne Beeinträchtigung der Kathodenstrahlen in demselben. Dies hielt LEXARD für einen untrüglichen und wichtigen Beweis seiner Anschauung, dass die Kathodenstrahlen Vorgänge im Aether seien, dass wägbare Materie für dieselben absolut nicht erforderlich sei. Diese Materie schien ihm sogar nur störend zu wirken; denn in seinem völlig luftleeren Aussenraume erhielt er meterlange Kathodenstrahlen.

Betrachten wir die LEXARD'schen Versuche im Lichte unserer hier vorgetragenen Theorie, so erkennen wir leicht, wie in seinem

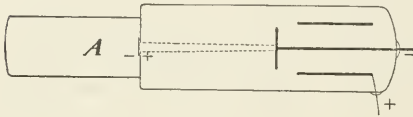


Fig. 6.

luftleeren Aussenraume Metall-
dampfmolekeln und also Kathodenstrahlen zustande kommen können. Treffen nämlich die in seiner Entladungsröhre erzeugten Kathodenstrahlen das über-

aus dünne Aluminiumfensterchen, so erhitzen sie dasselbe augenblicklich sehr stark. Zugleich wirkt die elektrische Verteilung durch Influenz (Fig. 6) auf das an die Erde angeschlossene Aluminiumblättchen des Fensterchens ein. Die abgestossene negative Elektrizität, welche bekanntlich aus erhitzten Körpern besonders leicht austritt, geht also (wegen jener Erhitzung des Aluminiumfensterchens und wegen der Plötzlichkeit des Vorganges) nicht nur durch die Metallfassung des Fensterchens zur Erde ab, sondern zum Teil auch an Metalldampfmolekeln gebunden in den Aussenraum A der Röhre hinein. Die Rolle, welche in den gewöhnlichen Entladungsröhren Luftmolekeln spielen, nämlich durch ihre Stösse auf die Kathodenoberfläche so viele Metalldampfmolekeln zu erzeugen, als zum Transport der Elektrizität nötig sind, spielen hier die Kathodenstrahlen bzw. die auf LEXARD's Fensterchen treffenden Metalldampfmolekeln des inneren Raumes seiner Entladungsröhre. Sie bringen das Aluminiumfensterchen für äusserst kurze Zeiteilchen auf eine genügend hohe Temperatur. (In der That wird LEXARD's Fensterchen

durch den Gebrauch verändert, aufgelöst.) Sind aber in dem völlig luftfreien Aussenraume der Entladungsröhre einmal Metalldampfmolekeln da, so unterhalten sie die Entladungen in demselben so lange, als die Entladungsröhre selber in Thätigkeit bleibt. Durch Auspumpen lassen sich diese Dampfmolekeln nicht aus dem betreffenden Raume entfernen, so lange sie geladen sind, weil sie dann stets zwischen der Elektrode und der Röhrenwand hin- und hergeworfen werden, nicht sich diffus ausbreiten, wie ich früher schon bemerkte. Sie sublimieren nur, wenn die Entladung aufgehört hat, sie sind aber sofort wieder imstande, in Dampfform überzugehen, wenn eine weitere Entladung einsetzt. Bei LENARD'S Versuchen mit dem Induktorium kommen übrigens noch die elektrischen Schwingungen des Induktoriums selber, vermöge seiner Selbstinduktion, in Betracht, welche Schwingungen das auch mit der Anode verbundene Aluminiumfensterchen kürzeste Zeit nach dem Ablauf der ersten Entladung zu einer schwächeren Kathode, dann wieder zur Anode, zur Kathode machen u. s. f. Es können folglich diese Versuche LENARD'S nicht als untrüglicher Beweis für seine Anschauung betrachtet werden, dass die Kathodenstrahlen Vorgänge im Aether selber seien. In seiner neuesten Arbeit über die elektrostatischen Eigenschaften der Kathodenstrahlen (WIED. Ann. 64, 1898) kommt übrigens LENARD selbst zu einem entsprechenden Schlusse. Er schreibt S. 279 darüber folgendes: „Das Resultat der Versuche war wirklich dieses: In jeder Hinsicht verhielten sich die Strahlen wie bewegte, negative Ladung führende, träge Massen. Dass dies auch ihr Verhalten im magnetischen Felde sei, ist seit langem bekannt.“ Nun fährt er aber fort: „Stellt man nun dem gegenüber das andere Resultat, dass die Kathodenstrahlen Vorgänge im Aether seien, so erscheint der Schluss unvermeidlich, dass hier eine Anzeige vorliege für die Existenz besonderer, bisher unbemerkt gebliebener Teile des Aethers, welche selbständig beweglich sind, welche Masse (Trägheit) besitzen und welche zugleich als Träger elektrischer Ladungen auftreten. Als solche Massen, in Bewegung befindlich, erscheinen die Kathodenstrahlen.“ Hier ist wohl die Hypothese neu, dass es bisher unbemerkt gebliebene Teile des Aethers seien, welche Träger der elektrischen Ladungen sein sollen. Wenn LENARD damit wenigstens indirekt zugiebt, dass die Kathodenstrahlen mit ihren schon früher von J. J. THOMSON, von W. WIEN und vielen Anderen gefundenen elektrischen Ladungen nicht durch Vorgänge des Aethers selber zu erklären sind, so liegt andererseits doch gar kein Grund vor, ein ganz

neues noch unbekanntes Medium als neuen Bestandteil des Aethers in die Vorstellungen einzuführen. Die hypothetische Annahme dieser neuen zwischen dem unwägbaren Aether und den wägbaren Materien stehenden Substanz, zum Zwecke der Erklärung der Kathodenstrahlen allein, bleibt immer etwas missliches. Wir sehen, dass die Dampfmolekeln der Elektroden vollständig für die Deutung der Kathodenstrahlen ausreichen, dass diese Deutung zwanglos an die Ihnen hier entwickelte Theorie der Gasentladungen sich anschliesst.

Mit der Untersuchung der Kathodenstrahlen haben sich in neuerer Zeit wieder viele Forscher befasst. Es sind auch, durch absichtlich hervorgebrachte Komplikationen in den Versuchsanordnungen, verschiedene Formen von Gasentladungen erzeugt worden, welche zu neuen Namen geführt haben. So hat GOLDSTEIN eine Versuchsanordnung bekannt gemacht mit einer neuen Art von Strahlen, welche er Kanalstrahlen nannte, weil dieselben aus eigens zu diesem Zwecke in der Kathode erzeugten Kanälen hervortreten. Es bleibt abzuwarten, ob diese und andere neu gefundene Strahlenarten neue Eigenschaften mit sich bringen, ob sie wirklich etwas anderes sind, als gewöhnliche Gasentladungen. Jedenfalls aber können wir hier nicht auf alle diese Versuche näher eintreten. Nur eine Art von Strahlen hat sich in der That schon als neu bewährt. Diese Strahlen wurden von RÖNTGEN entdeckt und X-Strahlen genannt, nach ihm aber von Vielen als Röntgenstrahlen bezeichnet. Auf diese wollen wir noch kurz eingehen.

Mit einer HITTORF'schen Vakuumröhre arbeitend, welche er mit schwarzem Karton völlig lichtdicht eingeschlossen hatte, fand RÖNTGEN Fluoreszenzwirkungen ausserhalb des Kartonkästchens an einem Baryumplatincyanürschirm. Nach allen bisherigen Erfahrungen konnten Kathodenstrahlen nicht ausserhalb der Röhre entstehen, ausser bei der oben besprochenen Versuchsanordnung LENARD's. Es trat aber jene Fluoreszenz auf, obgleich die benutzte Röhre kein LENARD'sches Fenster besass. In der That machte RÖNTGEN seine wichtige Entdeckung nicht mit einer LENARD'schen, sondern mit einer HITTORF'schen Röhre mit Hohlkathode, von welcher konvergente Kathodenstrahlen ausgehen, die in bekannter Weise ein Platinblech zum Glühen bringen. (Diese Röhrenart ist seither speziell für Röntgenstrahlen von vielen Experimentatoren neu erfunden und „Focusröhre“ genannt worden.) Es schien sich also bei seinen Versuchen wirklich um eine neue, noch unbekannt

Strahlenart zu handeln. In sorgfältiger Experimentaluntersuchung verglich nun RÖNTGEN die Eigenschaften seiner neuen X-Strahlen mit denjenigen der Kathodenstrahlen, und er stellte die Aehnlichkeiten, sowie die Verschiedenheiten beider Strahlenarten in muster-gültiger Weise fest.

Das Interesse, welches die Röntgenstrahlen in der ganzen Welt gefunden haben, war ein so grosses, dass sich Jedermann rasch so gut als möglich über die wichtigeren Eigenschaften dieser neuen Strahlenart erkundigt hat, und ich kann Ihnen also über dieselben kaum noch viel Neues erzählen. Ich will deshalb nur die gegenwärtig unbedingt sicher gestellten hauptsächlichsten Eigenschaften derselben nochmals hervorheben.

Die Röntgenstrahlen entstehen da, wo Kathodenstrahlen auf einen Körper treffen; sie breiten sich geradlinig nach allen Richtungen aus; sie sind an sich fast unsichtbar. RÖNTGEN fand nur einmal eine Wirkung der X-Strahlen auf sein Auge, mit einer sehr wirksamen Hittorfröhre, welche bald darauf unbrauchbar wurde. Er glaubte seiner Beobachtung nicht ganz sicher zu sein und erwähnte sie deshalb in seiner ersten Mitteilung nicht. BRANDES und DORN stellten aber eine solche Wirksamkeit auf das Auge endgültig fest, und RÖNTGEN bestätigte später ihr Resultat. Die Röntgenstrahlen wirken auf fluorescierende Körper Fluorescenz erregend ein. Sie sehen den Baryumplatincyanürschirm hell aufleuchten, wenn ich diese Röntgenröhre in Betrieb setze. Die Röntgenstrahlen leiten die Zersetzung von Silbersalzen in den photographischen Trockenplatten ein, geben also zur Entstehung photographischer Bilder Veranlassung. Für Röntgenstrahlen sind alle Körper mehr oder weniger durchlässig, sogar die Metalle. RÖNTGEN konnte späterhin durch 4 cm dicke Eisenplatten hindurch noch Wirkungen der X-Strahlen nachweisen. Er photographierte eine Jagdflinte mit X-Strahlen. Im photographischen Bilde, von welchem er mir gütigst eine Kopie überlassen hat, erkennen Sie in den Patronen noch die Zünder, die Bleikugeln mit ihren Gussansätzen, sogar die Pappdeckelscheiben, welche die Kugeln vom Pulver trennen, nachdem alles durch die dicken Stahlläufe hindurch von ihm photographiert worden ist. RÖNTGEN fand eine geringe diffuse Reflexion seiner X-Strahlen, aber gar keine Brechung, keine Polarisation, keine Interferenz, keine magnetische Ablenkbarkeit. Diese Beobachtungen RÖNTGEN's sind anfangs zum Teil angefochten worden. Insbesondere wollten verschiedene Forscher eine Brechung bezw. Beugung, also

Interferenzen der X-Strahlen gefunden haben, aus welchen sie die zugehörigen Wellenlängen bestimmten. Indessen scheinen doch bis dahin die Befunde RÖNTGEN's in vollem Umfange sich bestätigt zu haben.

In einer zweiten und dritten Mitteilung stellte RÖNTGEN noch folgendes fest: Die X-Strahlen entladen elektrisierte Körper, positiv wie negativ geladene. Es halten zum Beispiel die beiden Aluminiumblättchen dieses Elektroskopes ihre Ladung sehr gut; sobald wir aber X-Strahlen auf das Elektroskop fallen lassen, durch die Glasplatten desselben hindurch, so fallen die Blättchen rasch zusammen, das Elektroskop wird entladen. Wenn Luft mit X-Strahlen be-

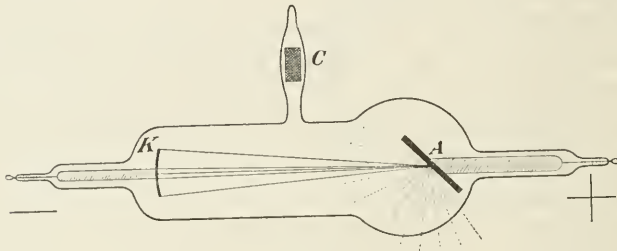


Fig. 7.

strahlt wird, so sendet sie selber wieder X-Strahlen aus und sie ist kurze Zeit nach der Bestrahlung noch imstande, elektrisierte Körper zu entladen. Eine Fläche, welche von Kathodenstrahlen getroffen wird, sendet X-Strahlen diffus aus, in fast gleicher Intensität unter allen Winkeln mit der Normalen der Fläche; nur tangential zur Fläche wird diese Ausstrahlung nahezu unmerklich. X-Strahlen, welche durch eine erste Substanzschicht hindurchgegangen sind, gehen leichter durch eine zweitfolgende gleiche Schicht der gleichen Substanz hindurch, als durch jene erste. Es gilt für die X-Strahlen nicht das gewöhnliche Absorptionsgesetz. Die Durchlässigkeit verschiedener Körper für die X-Strahlen ist in hohem Grade abhängig von der Güte des Vakuums in der Entladungsröhre. Meine Röntgenröhre (hergestellt von der Glühlampenfabrik HARD in Zürich) enthält im Inneren ein Stück ausgeglühter Lindenkohle C, zur Regulierung des Vakuums (Fig. 7). Wenn ich nun diese Kohle erwärme, so lässt sie absorbiertes Gas frei. Der Druck in der Röhre wird nach langem Erwärmen so gross, dass ihre X-Strahlen die Substanzen nur noch schwach durchstrahlen. Die Röhre ist „weich“, wie RÖNTGEN sagt. Lasse ich die Kohle sich abkühlen, so absor-

biert sie wieder Gas. Der Gasdruck wird in der Röhre geringer, die Röhre wird „hart“, und nun durchstrahlen ihre X-Strahlen die Substanzen sehr leicht. Mit einer harten Röhre stellte RÖNTGEN seine Photographie der Jagdflinte her.

Ohne hier auf alle übrigen Einzelresultate von RÖNTGEN und von anderen Experimentatoren einzugehen, will ich schliesslich nur noch erwähnen: 1. eine Mitteilung von DORN, nach welcher dieser Forscher zuerst eine erwärmende Wirkung der Röntgenstrahlen nachgewiesen hat; 2. Mitteilungen verschiedener Beobachter, nach welchen die Körperhaut sehr empfindlicher Personen durch intensive X-Strahlen teilweise angegriffen worden ist, wenn dieselbe der Entladungsröhre zu nahe kam; 3. die bekannte grosse Bedeutung, welche die Röntgenstrahlen für die medizinische Diagnostik gewonnen haben, dadurch, dass sie verschiedene Körperteile ungleich durchstrahlen und also in Abbildungen auch im Inneren des Körpers befindliche Teile, wie Knochen, Herz, Fremdkörper erkennen lassen.

Ueber das Wesen seiner X-Strahlen hat sich RÖNTGEN in seiner ersten Mitteilung dahin geäussert, dass wir es vielleicht bei denselben mit longitudinalem Licht zu thun haben könnten. Diese Hypothese scheint keinen grossen Anklang gefunden zu haben, vielmehr wurden andere Ansichten geäussert. LENARD glaubte, die Röntgenstrahlen seien Kathodenstrahlen, welche durch den Magnet nicht abgelenkt werden. Andere Forscher bezeichneten die Röntgenstrahlen schlechtweg als ultraviolettes Licht von überaus kleiner Wellenlänge. In einem hier in Freiburg vor etwa 2 Jahren gehaltenen Vortrage (Beilage zur „Allgemeinen Zeitung“ vom 24. Juli, München 1896) und in meinem Buche („Mechanik des Weltalls“, Freiburg i. B. 1897) habe ich eine Hypothese über die Natur der X-Strahlen aufgestellt, welche mit keiner von diesen genannten Anschauungen ganz harmoniert, welche aber der von RÖNTGEN zuerst ausgesprochenen Vermutung in gewisser Beziehung entgegenkommt. Aus unseren Entwicklungen des Wesens der Kathodenstrahlen geht klar hervor, dass wir die Röntgenstrahlen in unserer Theorie unmöglich mit LENARD als Kathodenstrahlen auffassen können; denn Dampfmolekeln dringen nicht ohne weiteres durch feste Wände hindurch. Dass die X-Strahlen einfach ultraviolettes Licht seien, also eine transversale Wellenbewegung des Aethers, ist ebenso unwahrscheinlich. Dagegen spricht der Mangel an Brechbarkeit, Polarisierung, Interferenz. Diese Vorgänge fehlen nur einer transversalen

Lichtwellenbewegung von der Wellenlänge Null, welche aber selbstredend gar kein Licht mehr ist. Alle an Röntgenstrahlen beobachteten Eigenschaften lassen sich indessen, wie mir scheint, im Anschlusse an die soeben entwickelte Theorie der Gasentladungen aus meiner Hypothese, die ich Ihnen noch kurz darlegen möchte, zwanglos ableiten und anschaulich machen.

Die Kathodenstrahlen, welche die Röntgenstrahlen entstehen lassen, sind von überaus kurzer Dauer. Werden nun Körper von intensiven Kathodenstrahlen getroffen, so erhitzen sich Teile derselben: ihre Oberflächen werden plötzlich glühend, kühlen sich aber fast ebenso rasch wieder ab. Weil nun die Molekeln in erhitzten Körpern — nach den von CLAUSIUS eingeführten Vorstellungen über die Wärmebewegung — in heftigeren Bewegungen sich befinden, relativ zu einander, als in kalten Körpern, so ist die Annahme naheliegend, dass die Aethermenge, welche an die Molekeln eines Körpers gebunden ist, sich mit der Temperatur desselben ändere. (Für diese Aenderung spricht die Aenderung des Brechungsexponenten einer Substanz mit der Temperatur.) Nehmen wir — nur des Beispiels halber, es könnte auch umgekehrt sein — den einen Fall an, die Molekeln eines Körpers, welche von Kathodenstrahlen getroffen werden, verlieren einen Teil ihres Aethers, sie reissen aber wieder Aether an sich, sobald die Gasentladung aufhört. Ist dies der Fall, so strömt beim Entstehen jedes Kathodenstrahls Aether aus der von ihm getroffenen Körperoberfläche aus, beim Verschwinden des Kathodenstrahls strömt Aether wieder ein. Ein solches plötzliches Aus- und Einströmen von Aether aus den von Kathodenstrahlen getroffenen Körperoberflächen halte ich für die Ursache der Röntgenstrahlen. Alle im Aether hervorgebrachten Störungen pflanzen sich geradlinig nach allen Richtungen mit ungeheurer Geschwindigkeit fort, nämlich mit Lichtgeschwindigkeit. Bei jedem Zustandekommen eines Kathodenstrahls entsteht also zuerst ein Stoss austretenden, dann ein Stoss eintretenden Aethers. Beide Stösse breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit von der betreffenden Stelle aus, nach allen Richtungen, sie setzen sich zu einer einzigen Stosswelle zusammen. Diese durchdringt alle Körper, weil der Aether, wie wir wissen, selber alle Körper mit Leichtigkeit durchsetzt. Die explosionsartigen Hin- und Herbückungen des Aethers gleichen allerdings in gewissem Sinne dem longitudinalen Lichte: sie sind Hin- und Herschwingungen des Aethers in der Fortpflanzungsrichtung. Ihre Periode ist aber gleich derjenigen der

sie erzeugenden Kathodenstrahlen, also gleich der Periode des schwingenden Stromunterbrechers, bezw. gleich derjenigen der Eigenschwingungen des Induktoriums oder gleich der Periode der Kathodenstrahlen als solcher, wenn diese etwa als Partialentladungen zustande kommen sollten, was ich indessen vorläufig nicht für wahrscheinlich halte. Jedenfalls verläuft von einer Aetherstosswelle bis zur nächstfolgenden eine verhältnismässig lange Ruhepause, und deshalb habe ich eben bei meinem Erklärungsversuch von Aetherstössen gesprochen.

Jede Molekel eines fremden Körpers, welche von einer solchen Aetherstosswelle getroffen wird, verhält sich ähnlich wie die von Kathodenstrahlen getroffenen Molekeln, wenn auch darin entgegengesetzt, dass sie zuerst etwas Aether aufnimmt, nachher diesen wieder abgibt. Also sendet sie selber auch X-Strahlen aus. Dabei entstehen Eigenschwingungen in ihr, vermöge des heftigen Stosses durch jene Aetherstosswelle; sie sendet ihr Eigenlicht aus, sie fluoresciert. Diese Eigenschaft macht die Wirkungen der Röntgenstrahlen komplizierter: Weil jede Molekel, welche von X-Strahlen getroffen wird, ihr Eigenlicht aussendet, sei dasselbe uns sichtbar oder nicht, so verlaufen nun mit der ursprünglichen Aetherstosswelle so viele Fluoreszenzlichtwellen, als verschiedenartige Molekeln von der Aetherstosswelle getroffen worden sind. In den X-Strahlen, welche auf dem Fluoreszenzschirm oder in den Trockenplatten ihre Wirkungen hervorbringen, können demnach enthalten sein: 1. die an der Stelle, an welcher die Kathodenstrahlen auf eine Wandung — etwa von Platin — treffen, entstandenen Aetherstosswellen, durch Absorption entsprechend geschwächt; 2. die Fluoreszenzlichtwellenbewegung jenes Platins; 3. die Fluoreszenzlichtwellenbewegungen aller Substanzen des durchstrahlten Glases der Entladungsröhre; 4. die Fluoreszenzlichtwellenbewegungen der durchstrahlten Luftmolekeln; 5. die Fluoreszenzlichtwellenbewegungen aller Molekelarten der durchstrahlten zu untersuchenden Substanz, vorausgesetzt, dass nicht einige von diesen Fluoreszenzlichtwellenbewegungen auf ihren Wegen durch Absorption völlig zum Verschwinden gebracht werden; endlich 6. die Aetherstosswellen bezw. die X-Strahlen, welche von allen durch die X-Strahlen erregten Molekeln selber wieder ausgesandt werden. In unseren Versuchen bezeichnen wir in der Regel die Summe aller dieser Strahlenarten als Röntgenstrahlen. Es ist klar, dass man diese so verschiedenartigen Vorgänge von einander trennen muss, so weit dies möglich ist.

Unter diesen Umständen ist verständlich, dass mit X-Strahlen bestrahlte Luft selber X-Strahlen aussendet, dass sie einen sichtbar fluorescierenden Körper, einen Baryumplatincyankürschirm, zum Leuchten bringt, wie Röntgen gefunden hat. Sein anderer Befund, dass X-Strahlen, welche eine Substanzschicht bereits durchdrungen haben, eine zweite gleiche Schichte derselben Substanz mit geringerer Absorption durchdringen, lässt sich aus unserer Theorie gleichfalls verstehen: Die Intensität der Aetherstosswellen wird allerdings durch Absorption geschwächt, nach Massgabe der Absorptionsgesetze; ein Teil der infolgedessen absorbierten Energie wird aber zu Eigenschwingungen in den Molekeln des betreffenden Körpers verwendet, und das entstehende Fluorescenzlicht, welches uns direkt ganz unsichtbar bleiben kann, durchdringt die Substanz, welcher es eigentümlich ist, fast ungeschwächt, wie Ihnen aus den Versuchen mit Fluorescenzlicht genügend bekannt ist. Dieses Fluorescenzlicht ist nach dem Austritt aus der Substanz weiterer Wirkungen auf Fluorescenzschirm, Trockenplatten u. s. w. fähig. In ähnlicher Weise erklärt sich die schwache von RÖNTGEN bei vielen Körpern gefundene Reflexion der X-Strahlen. Die betreffenden Substanzen senden infolge der sie erreichenden Aetherstosswellen neue solche Wellen, aber ausserdem noch ihr Eigenlicht aus, auch wenn sie nur unsichtbar fluorescieren. Sie erregen somit unter Umständen Fluorescenz einer in ihrer Nähe befindlichen sichtbar fluorescierenden Substanz oder sie haben eine analoge Wirkung. Die Elektrizität entladende Wirkung der Röntgenstrahlen ist gleichfalls zum Teil durch solches Eigenlicht der bestrahlten Substanz zu erklären, analog wie Bestrahlung negativ elektrisierter Körper mit ultraviolettem Lichte die Entladung dieser Körper begünstigt. [Denn die Molekeln an der Oberfläche eines elektrisierten Körpers werden durch die Aetherstosswellen, welche wir als Ursache der Röntgenstrahlen bezeichnet haben, erschüttert, in Eigenschwingungen versetzt, und analog werden die von ultraviolettem Licht getroffenen Molekeln zu Schwingungen angeregt, teils zu den durch dieses erzwungenen Schwingungen, teils zu ihren Eigenschwingungen. In beiden Fällen müssen durch die heftigere Schwingungsbewegung in der Körperoberfläche die Gasmolekeln, welche auf den elektrisierten Körper stossen, mit grösseren Geschwindigkeiten an den bestrahlten Oberflächenstellen weggetrieben werden, als an den nicht bestrahlten. Es entstehen Konvektionsströme, welche, wie wir bei unseren früheren Betrachtungen gesehen haben, den elektrisierten Körper rasch entladen,

während derselbe seine Ladung nur langsam verliert, wenn solche Konvektionsströme nicht auftreten. Die Molekeln bestrahlter Luft bewahren überdies ihre Eigenschwingungen eine Zeit lang, wie alle fluorescierenden Körper. Wird also mit Röntgenstrahlen (und wohl auch mit ultraviolettem Lichte?) bestrahlte Luft gegen einen elektrisierten Körper hingeleitet, so werden wiederum an denjenigen Oberflächenstellen des Körpers, welche von dieser Luft getroffen werden, die Luftmolekeln vermöge ihres Bewegungszustandes mit grösseren Geschwindigkeiten zurückgestossen, als an anderen Oberflächenstellen. Neue Konvektionsströme entstehen in der Luft, und damit kommt eine stärkere Elektrizitätsentladung zustande, als ohne Bestrahlung der Luft. Dass endlich durch die plötzlichen Aetherstosswellen Affinitätsänderungen bewirkt werden, welche in leicht zersetzlichen Substanzen, in photographischen Trockenplatten und in gewissen organischen Substanzen (Retina des Auges etc.) Zersetzungen bezw. Umsetzungen einleiten können, bedarf nach den bisherigen Entwicklungen nicht noch einer weitergehenden Erörterung¹.]

Sind die Röntgenstrahlen nur solche Aetherstosswellen, so ist bei ihnen keine Brechung zu erwarten, weil auf eine einzige Aetherstosswelle das HUYGENS'sche Prinzip nicht genau in derselben Weise anwendbar ist, wie auf eine periodische Wellenbewegung. Interferenzen können wir bei unseren gegenwärtigen Versuchsanordnungen gleichfalls nicht finden, weil es sich um keine für uns messbaren Wellenlängen handelt. [Würden wir aber absichtlich eine Periodizität in die Kathodenstrahlen hineinbringen, etwa durch Erzeugung derselben vermittelt HERTZ'scher elektrischer Schwingungen, so würden sich zweifelsohne auch in den Röntgenstrahlen die entsprechenden Interferenzen nachweisen lassen¹.] Polarisation ist bei einer solchen Schwingungsart überhaupt nicht vorhanden. Eine magnetische Ablenkbarkeit endlich ist deshalb undenkbar, weil die X-Strahlen nicht wie die Kathodenstrahlen durch hin- und herzuckende elektrisierte Molekeln, sondern nur durch derartig bewegte Aetherteilchen gebildet werden. Es scheint demnach, dass die bis dahin gefundenen Eigenschaften der Röntgenstrahlen sich recht gut aus unserer Hypothese über die Natur dieser Strahlen verstehen lassen, dass auch der Anschluss an die Theorie der elektrischen Gasentladungen ein zwangloser ist. So lange dieses der Fall ist, kann wohl unserer Hypothese die Berechtigung nicht abgesprochen

¹ Das in eckige Klammern Eingeschlossene ist, zum Teil wegen vorgerückter Zeit, im Vortrage weggelassen worden.

werden. (Zum Schlusse wird die Röntgenröhre mit dem regulierbaren Vakuum nochmals in Betrieb gesetzt, es wird die Durchleuchtung des menschlichen Körpers gezeigt und eine photographische Aufnahme mit Röntgenstrahlen gemacht.)

Zusätze:

1. Es liegt kein Widerspruch darin, dass eine Molekelart optische Wellenbewegungen, welche sie selber aussenden kann, stark absorbiert, dass sie aber ihr Eigenlicht, das Fluorescenzlicht leicht wieder ausstrahlt, also wenig absorbiert. Man sieht diese Erscheinung besonders schön an fluorescenzfähigen Kristallen, welche unter dem Einflusse der Kathodenstrahlen an ihrer ganzen Oberfläche ihr Fluorescenzlicht aussenden, auch an denjenigen Oberflächenteilen, welche von keinen Kathodenstrahlen getroffen werden. Das Fluorescenzlicht enthält nämlich, weil es das Eigenlicht der Substanz ist, alle möglichen Eigenschwingungen in bestimmter der Substanz eigentümlicher Zusammensetzung, und es wird, abgesehen von unvermeidlichen Verlusten, alles absorbierte Eigenlicht von der betreffenden Molekelart als solches wieder ausgestrahlt, so lange, bis das entsprechende Gleichgewicht mit der Umgebung hergestellt ist. Wird dagegen die Molekel nur mit einer einzigen oder mit einigen wenigen, nicht mit allen Lichtarten bestrahlt, welche sie selber ausstrahlen kann, so absorbiert sie diese Lichtarten nicht nur, um sie sogleich wieder auszustrahlen, sondern in ihrem Inneren werden infolge des gegenseitigen Einflusses ihrer Teile, ihrer Atome, ihrer Aetherhüllen auf einander, die entsprechenden Eigenschwingungen zum Teil in ganz andere Arten ihrer Eigenschwingungen umgewandelt. Was sie nunmehr ausstrahlt, ist ihr Gesamt-Eigenlicht, ihr Fluorescenzlicht, in welchem die wenigen aufgenommenen und absorbierten Lichtarten verhältnismässig schwach vertreten sind, so dass eine entsprechend starke Absorption, ein wirklicher Verlust der aufgenommenen Lichtwellenbewegungen sich zu erkennen giebt.

2. Mehratomige Gasmolekeln werden bei starken Verdünnungen in der Entladungsröhre, bei stärkeren elektrischen Kräften dissoziiert (S. 6) und gehen sodann, beispielsweise an den Röhrenwandungen, neue Verbindungen ein. Sie kehren in diesem Falle unter Umständen gar nicht mehr zur Kathode zurück. Dadurch gewinnen einatomige Metaldampfmolekeln, besonders diejenigen edler Metalle, welche geringe Affinität zu anderen vorhandenen Substanzen haben, einen Vorteil über die Gasmolekeln: Sie übernehmen den Elektrizitätsaustausch an der Kathode mehr oder weniger vollständig.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 1899-1901

Band/Volume: [11](#)

Autor(en)/Author(s): Zehnder Ludwig

Artikel/Article: [Ueber Kathodenstrahlen und Röntgenstrahlen. 1-32](#)