**3. *Pflanzt sich der Stoß
von Kanalstrahlen in einem festen Körper fort?*
von J. Stark u. G. Wendt.**

(Hierzu Taf. VIII, Fig. 9.)

§ 1. *Problem.* — Nach der von dem einen von uns aufgestellten Valenzhypothese¹⁾ vermitteln elektrische Kraftlinien welche von negativen punktförmigen Valenzelektronen nach ausgedehnten positiven Sphären laufen, sowohl die Zusammenbindung von Atomen zu chemischen Molekülen, wie auch die Zusammenbindung von chemischen Molekülen zu flüssigen und festen Aggregaten; nur sind die Valenzfelder zwischen benachbarten Molekülen (zwischenmolekular) im allgemeinen viel schwächer als zwischen den Atomen im Molekül (innermolekular). Aus diesem Grunde bewahrt das chemische Molekül im flüssigen und selbst im kristallisierten Zustand seine Individualität, so daß wir in diesem Sinne noch von einem Molekül²⁾ sprechen können. Während wir indes das Molekül im gasförmigen Zustand zwischen zwei aufeinander folgenden Zusammenstößen kräftefrei laufend annehmen, ist das Molekül im festen Zustand durch seine zwischenmolekularen Felder an benachbarte Moleküle gebunden; zur Kennzeichnung dieses Unterschiedes mag das Molekül in jenem Falle gasförmig, in diesem Falle fest heißen.

Während die Kinetik der gasförmigen Moleküle weitgehend durchgebildet ist, wissen wir über die Dynamik der festen Moleküle noch wenig Zuverlässiges; insbesondere fehlen uns Erfahrungen, welche einen Schluß auf die elementaren Vorgänge an dem einzelnen festen Molekül zulassen. In dieses unentwickelte Kapitel der Physik gehört folgendes Spezialproblem.

1) J. Stark, Jahrb. d. Rad. u. El. 5. p. 124. 1908.

2) Vgl. J. Stark, Die elementare Strahlung p. 125. S. Hirzel, Leipzig 1911.

Stößt ein endlicher fester Körper in einer endlichen Berührungsfläche auf einen anderen festen Körper, so treten in dem einen wie in dem anderen Körper gleichzeitig sehr viele Moleküle untereinander zusammenhängend in Volumenelementen in Wirkung; es liegt die mediumdynamische Erscheinung des elastischen Stoßes vor. Stoßen dagegen die Atome oder Moleküle eines Kanalstrahlenbündels auf einen festen Körper, so übt ein jedes für sich ohne Zusammenhang mit den benachbarten und folgenden Kanalstrahlenteilchen Kräfte auf die unmittelbar von ihm gestoßenen Moleküle aus; diese selber treten nicht zusammen mit allen benachbarten Molekülen, sondern nur in geringer Zahl in unregelmäßiger dünner unzusammenhängender Anordnung auf der getroffenen endlichen festen Fläche einzeln für sich in Rückwirkung auf den Stoß. Dieser Vorgang ist somit atomdynamischer Natur. Unter diesem Gesichtspunkt haben wir ihn zum Gegenstand einer experimentellen Untersuchung gemacht und einige, vielleicht neuartige Erscheinungen beobachtet. Bevor wir sie beschreiben, seien hier die Überlegungen mitgeteilt, welche uns zum Teil geleitet haben, zum Teil durch die Resultate unserer Beobachtungen angeregt worden sind. Wer derartigen Erwägungen abhold ist, möge sie überschlagen.

Denken wir uns zunächst eine Reihe von gleichartigen Molekülen, deren Mittelpunkte alle auf derselben Achse liegen und zwischen denen bei Änderung ihres Abstandes keine Kräfte wirksam sind. Auf das vorderste Molekül soll ein anderes Molekül zentral in der Mittelpunktsachse stoßen. Es wird dann zunächst sowohl das stoßende wie das gestoßene Molekül deformiert und durch die dabei entwickelten Kräfte wird dieses nach dem Innern der Molekülreihe beschleunigt; das gestoßene beschleunigte Molekül gewinnt so eine nach dem Innern gerichtete Bewegungsgröße, rückt bis zum nächsten gleichartigen Molekül vor, überträgt auf dieses während des Zusammenstoßes seine Bewegungsgröße und setzt sich nahezu an den Ort des von ihm fortgestoßenen Moleküls. Dieses tut das gleiche mit dem nächstfolgenden Molekül und so pflanzt sich der Stoß entlang der Molekülreihe fort, bis er das letzte Molekül erreicht und dieses dauernd aus ihr herauswirft, wenn es nicht durch äußere Kräfte nach Verlust der übernommenen

Bewegungsgröße wieder in die Reihe zurückgeführt wird. Diese selbst wird durch die molekulare Fortpflanzung des Stoßes um den Abstand zweier benachbarter Moleküle in der Richtung der stoßenden Bewegungsgröße verschoben.

Der hier angenommene Stoß gasförmiger Moleküle heißt rein elastisch, wenn die stoßende kinetische Energie nach ihm dieselbe ist wie vor ihm. Es ist möglich, daß während des Stoßes Teile oder Valenzfelder des stoßenden oder des gestoßenen Moleküls Energie in schwingender Form aufnehmen und sie als schwingende Energie wieder abgeben; in diesem Fall nimmt die kinetische Stoßenergie bei der Fortpflanzung durch Verwandlung in schwingende Energie ab. Die Amplitude der kinetischen Energie des rein elastischen Stoßes bleibt bei der Fortpflanzung längs einer Reihe gleichartiger Moleküle konstant; dagegen nimmt die Amplitude des Schwingungen erregenden Stoßes bei der Fortpflanzung ab. Rein elastische und Schwingungen erregende Stöße können bei der Fortpflanzung des molekularen Stoßes miteinander abwechseln.

Sind die gasförmigen Moleküle nicht, wie angenommen wurde, längs einer Achse angeordnet, sondern unregelmäßig nach dem Spiele des Zufalls in einem Volumenelement verteilt, so kommen bei der Fortpflanzung des molekularen Stoßes neben zentralen auch zahlreiche schiefe Stöße vor; es tritt eine Ablenkung oder Teilung der kinetischen Stoßenergie nach Richtungen ein, welche gegen die anfängliche Achse der Bewegungsgröße der Energie geneigt sind; oder mit anderen Worten die Amplitude des molekularen Stoßes nimmt in diesem Falle bei der Fortpflanzung infolge von „Zerstreuung“ ab.

Von diesen Betrachtungen über die Fortpflanzung des molekularen Stoßes in einem Aggregat gasförmiger Moleküle gehen wir nun über zur Untersuchung des molekularen Stoßes auf feste Moleküle und zwar zunächst des rein oder schwingend elastischen Stoßes. Dieser liegt vor, wenn ein gasförmiges Molekül dank seiner kinetischen Energie auf ein festes Molekül trifft, erst seine inner- und zwischenmolekularen Valenzfelder bis zu einem gewissen Betrag deformiert unter Verwandlung seiner kinetischen Energie in potentielle, dann von dem gestoßenen deformierten Molekül wieder so weit zurückgedrängt wird, daß dieses seine Lage und Bindung vor

dem Stoß wieder einnehmen kann. Bei diesem elastischen molekularen Stoß auf feste Moleküle erfolgt also keine dauernde Verschiebung der an dem Stoß beteiligten Moleküle; diese pflanzen ihn auch nicht in das Innere des festen Molekül-aggregates fort. Wohl aber kann der elastische Stoß auf feste Moleküle mit einer Erregung von Schwingungen an ihnen oder an dem stoßenden gasförmigen Molekül verbunden sein; die aus einem solchen Stoß entspringenden Schwingungen können sich dann in das Innere des festen Molekül-aggregates fortpflanzen. Zu beachten ist noch, daß bei dem elastischen Stoß eines gasförmigen Moleküls auf ein festes Molekül auch die diesem benachbarten festen Moleküle dank der Vermittlung der zwischenmolekularen Valenzfelder in Mitwirkung treten.

Außer dem elastischen molekularen Stoß auf feste Moleküle erscheint nun noch der „dissoziierende“ Stoß möglich. Werden nämlich infolge des Stoßes eines gasförmigen Moleküls die zwischenmolekularen Valenzfelder des gestoßenen festen Moleküls bis zu einem bestimmten Maximum deformiert, so wird das feste Molekül bei genügender Stoßenergie aus seiner zwischenmolekularen Bindung gelöst und als „gelöstes“ Molekül unter Übernahme von kinetischer Energie aus seiner Lage heraus weitergestoßen; als solches trägt es kinetische Energie weiter, bis es auf ein folgendes festes Molekül stößt. Bei diesem erneuten Stoße eines gelösten Moleküls auf ein festes kann sich der dissoziierende Stoß wiederholen; unter Abgabe seiner kinetischen Energie wird also das stoßende Molekül das gestoßene zu einem weiterlaufenden gelösten Molekül machen, selber aber nach Verlust seiner Bewegungsgröße wieder fest werden, indem es an dem Ort des fortgestoßenen Moleküls nach benachbarten festen Molekülen wieder zwischenmolekulare Valenzfelder herstellt. Indem sich diese Vorgänge längs einer Reihe von hintereinander liegenden festen Molekülen wiederholen, wird der dissoziierende molekulare Stoß auf eine endliche Strecke in den festen Körper hinein sich fortpflanzen können.

Erreicht der dissoziierende Stoß bei seiner Fortpflanzung im Innern eines festen Körpers eine Grenzfläche des Körpers gegen einen Gasraum, so kann ein in der Grenzfläche liegendes

festes Molekül, wenn es von dem aus dem Innern kommenden molekularen Stoß erreicht wird, aus ihr heraus in den angrenzenden Gasraum gestoßen werden. Doch ist hierzu eine beträchtliche Stoßenergie nötig, da bei der dauernden Abtrennung des Moleküls von den Nachbarmolekülen unter Überführung in den Gasraum eine viel größere Arbeit zu leisten ist als bei der dauernden Verschiebung eines Moleküls im Innern des festen Aggregates. In den meisten Fällen wird aber die fortgepflanzte molekulare Stoßenergie zur Leistung dieser Arbeit nicht ausreichen; es wird dann das letzte vom Stoß erfaßte Molekül nur bis zu einem gewissen Betrag von der Oberfläche fortgedrängt werden, danach unter Schwingungen sich wieder an sie anlagern. Indes wird es nicht mehr in seine frühere Lage zurückkehren können, da in dieser ein anderes Molekül sitzt, es wird vielmehr aus der Oberfläche herausgeschoben und auf ihr sich festsetzen.

Nun ist der elementare Vorgang der Fortpflanzung des einzelnen molekularen Stoßes unserer Beobachtung nicht zugänglich. Wenn indes an zahlreichen dicht nebeneinander liegenden Molekülreihen die Fortpflanzung des molekularen Stoßes in zahlreicher Wiederholung die Grenzfläche des festen Körpers in einem endlichen Bezirk erreicht, so wird dieser Bezirk aus seiner Umgebung um einen gewissen Betrag herausgeschoben erscheinen. Lassen wir demnach auf der einen Seite einer planparallelen festen Platte längere Zeit schnelle gasförmige Moleküle, etwa ein Kanalstrahlenbündel, normal innerhalb eines kleinen Bezirkes auffallen, so muß, gemäß vorstehenden Folgerungen, in gewissen Fällen auf der anderen Plattenseite in der Achse des Bündels unterhalb der Auftreffstelle eine geringe Erhebung sich ausbilden.

Die gleiche endliche Wirkung ist unter folgenden Voraussetzungen zu erwarten. Erreicht die Fortpflanzung des dissoziierenden Stoßes nicht die Oberfläche der festen Platte, sondern kommt sie im Innern der Platte zum Stillstand, so wird das letzte verschobene Molekül in einem kleineren Abstand von den benachbarten Molekülen sich lagern müssen als die anderen Moleküle, und wiederholt sich dieser Vorgang an zahlreichen Molekülen im Innern der festen Platte, so wird sich hier in einem Gebiete unter der Auftreffstelle der Kanalstrahlen eine

Verdichtung in der Moleküllagerung ergeben, diese wird Spannungen nach allen Seiten zur Folge haben, und ist der feste Körper plastisch, so wird die Platte über dem Verdichtungsgebiet auf der Rückseite eine Deformation in Gestalt einer geringen Erhebung erfahren.

Wie der elastische Stoß, so kann der dissoziierende Stoß mit einer Erregung von Schwingungen in inner- oder zwischenmolekularen Valenzfeldern verbunden sein und dadurch bei seiner Fortpflanzung gedämpft oder absorbiert werden. Und ebenso wie jener wird er bei seiner Fortpflanzung eine gewisse Zerstreuung erfahren. Der dissoziierende Stoß wird sich demnach um so weiter in festen Körpern fortpflanzen, je weniger er absorbiert und zerstreut wird. Dies wird offenbar in dem geordneten Aggregat gleichartiger Moleküle eines Kristalles weniger der Fall sein als in einem amorphen oder aus vielen kleinen Kristalliten zusammengesetzten Körper. Ferner wird die Zerstreuung in regulären Kristallen geringer sein als in Kristallen von niedrigerer Symmetrie, und ebenso wird die Fortpflanzung um so weiter vordringen, je geringer die Zahl der Atome und je stärker ihre Bindung im Molekül ist.

Endlich ergibt sich aus den hier zugrunde gelegten Voraussetzungen noch eine Folgerung über den Schwellenwert der kinetischen Energie für die Fortpflanzung des dissoziierenden Stoßes. Für die Lösung eines festen Moleküls aus seiner zwischenmolekularen Bindung und seine Schiebung im dissoziierenden Stoß ist ein bestimmter Betrag von Arbeit nötig. Darum kann der sich fortpflanzende dissoziierende Stoß erst oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes¹⁾ der kinetischen Energie eines Kanalstrahlenteilchens eintreten. Je kleiner jene Arbeit ist, desto kleiner ist dieser Schwellenwert. Demgemäß wird sich der dissoziierende Stoß unter sonst gleichen

1) Der dissoziierende Stoß von Kanalstrahlen, der an deren Auftreffstelle am festen Körper zur Zerstäubung führt, ist ebenfalls erst oberhalb eines Schwellenwertes der Energie des Kanalstrahlenteilchens möglich. Vgl. G. Granquist, *Svensk. Akad. Förh.* 55. p. 709. 1898; L. Holborn u. L. Austin, *Abh. d. Phys.-Techn. Reichsanst.* 4. p. 101. 1904; V. Kohlschütter, *Zeitschr. f. Elektrochem.* 15. p. 316. 1909; J. Stark, *Jahrb. d. Rad. u. El.* 6. p. 168. 1909; *Zeitschr. f. Elektrochem.* 15. p. 511. 1909.

Umständen um so weiter fortpflanzen und in seiner endlichen Wirkung um so leichter nachzuweisen sein, je weniger Arbeit die Herstellung einer dauernden Deformation an einem endlichen Teil eines Kristalles erfordert, je größer also, weniger bestimmt gesagt, seine „Plastizität“ ist.

§ 2. *Methoden.* — Auf Grund der vorstehenden Überlegungen suchten wir eine experimentelle Antwort auf folgende Frage. Wenn eine planparallele Platte auf einem kleinen Bezirk einer ihrer zwei ebenen Flächen längere Zeit dem Stoß sehr schneller Kanalstrahlen ausgesetzt wird, bildet sich dann auf der anderen Fläche über der Auftreffstelle der Kanalstrahlen eine geringe Erhebung aus?

Zur Beantwortung dieser Frage bedienten wir uns der Anordnungen in Figg. 1—3, welche in der vorausgehenden Abhandlung beschrieben sind. Die zu untersuchenden Platten wurden also unmittelbar auf die Rückseite der Kathode aufgelegt. In unseren ersten Beobachtungen befestigten wir sie nach Anordnung 1, später nur mehr nach Anordnung 2 und 3. Die verwandte Stromröhre hatte die aus Fig. 4 der vorausgehenden Abhandlung ersichtliche Form. Als Stromquelle diente das früher gebrauchte Induktorium; auch die übrigen Methoden für Herstellung von Wasserstoff- und Quecksilberkanalstrahlen waren dieselben wie früher.

Zur Untersuchung kamen quadratische oder sechsseitige Platten aus Steinsalz, Sylvin, Flußspat, Kalkspat, Quarz und Glas; ihre Fläche betrug ungefähr 1 cm^2 , ihre Dicke in den meisten Fällen 0,8—1 mm; die Anwendung einer geringeren Dicke war bei einem Teil dieser Substanzen deswegen nicht möglich, weil eine schädliche Erwärmung (Glas) oder nach kurzer Zeit Zerspringen erfolgte. Mit Ausnahme von Quarz und Glas wurden die Kristallplatten von Dr. Steeg & Reuter (Homburg v. d. H.) bezogen. Bevor sie der Wirkung der Kanalstrahlen ausgesetzt wurden, wurden die Flächen einer jeden Platte durch Auflegen einer 1,5 mm dicken planparallelen Glasplatte von Zeiss und durch Betrachtung der Newtonschen Interferenzstreifen in Natriumlicht darauf geprüft, wie weit sie eben waren. An die Kathode wurden sie darauf so angesetzt, daß die Fläche von besserem ebenem Schliff Rückseite war, also nicht von den Kanalstrahlen getroffen wurde.

Mit Ausnahme einiger Steinsalzplatten und einer Flußspatplatte waren die gelieferten Platten, wenigstens in einiger Entfernung von ihrem Rande vor der Exposition nahezu vollkommen eben.

Die Platten wurden zumeist 1—3 Stunden der Einwirkung sehr schneller Kanalstrahlen (Kathodenfall größer als 10000 Volt) ausgesetzt; nur bei einigen Steinsalz-, Sylvín- und bei dünnen Glasplatten dauerte die Bestrahlung kürzer, wie weiter unten näher angegeben werden wird.

Nach der Exposition wurden die Platten auf folgende Arten untersucht. Bei Steinsalz und Sylvín waren die Erhebungen unter der Auftreffstelle auf der Rückseite der Platten so groß, daß sie an der Krümmung des Bildes eines geradlinigen Glühlampenfadens erkannt werden konnten, der so gestellt oder verschoben wurde, daß die von ihm ausgehenden Lichtstrahlen an der zu untersuchenden Plattenfläche in das Auge reflektiert wurden. In diesen Fällen konnte die Erhebung auch mikroskopisch nachgewiesen werden. Wurde nämlich die Platte mit ihrer exponierten Fläche nach unten so unter das Objektiv gelegt, daß der Rand der Auftreffstelle gerade durch die Mitte des Gesichtsfeldes ging, und danach auf die feinen Politurrisse auf der Rückseite scharf eingestellt, so erschienen diese immer bei größerer Höhe des Objektivs scharf, wenn sie über der Auftreffstelle der Kanalstrahlen als wenn sie daneben lagen. Für genaue Messungen ist diese Methode wegen mehrerer Fehlerquellen nicht geeignet. Sie kann lediglich die Größenordnung der Erhebung liefern.

Bei den anderen Platten wurde nach einer Erhebung auf der Rückseite mit Hilfe der interferometrischen Methode gesucht. Es wurde also auf die nicht exponierte Fläche die erwähnte vollkommen ebene planparallele Glasplatte gelegt und nachgesehen, ob der Verlauf der Newtonschen Interferenzstreifen an der Stelle über der Auftreffstelle eine Störung zeigte.

Bei der beschriebenen Exposition der Platten ist darauf zu achten, daß die Achse des Kanalstrahlenbündels durch das Loch in der Kathodenoberfläche hindurch die Plattenfläche trifft. Mit sinkendem Gasdruck nimmt nämlich der Querschnitt des Kanalstrahlenbündels ab; er wurde unter unseren Bedingungen für einen Kathodenfall über 15000 Volt kleiner

als 3 mm^2 , also kleiner als die Stelle auf der Plattenfläche, welche die Öffnung des Kathodenkanals füllt; dazu nimmt dann in diesem Falle von der Achse des Kanalstrahlenbündels weg nach außen auf sehr kurzer Strecke sowohl die Dichte wie die Geschwindigkeit der Kanalstrahlen ab. Nun kommt es bei etwas schiefer Stellung der Kathode zur Rohrachse oder infolge der Bildung eines Zerstäubungsbelages auf der Glaswand leicht vor und besonders beim Arbeiten mit Quecksilberkanalstrahlen, daß sich das Kanalstrahlenbündel relativ zur Rohrachse neigt oder verschiebt; dann treffen die schnellsten Strahlen nicht mehr in den Kathodenkanal und somit auch nicht auf die zu exponierende Plattenfläche, und Verlängerung der Exposition führt nicht zum Ziele. Eine solche fehlerhafte Exposition ist nach der Herausnahme der Platte aus der Röhre leicht daran zu erkennen, daß auf der Auftreffstelle der Kanalstrahlen, die sich ja infolge der Zerstäubung immer in scharfer Umgrenzung in die vordere Plattenfläche einsenkt, eine kleine muldenförmige Vertiefung fehlt. Diese bildet sich nämlich bei richtiger Exposition immer in einem kleinen Bezirk rings um die Achse des Kanalstrahlbündels, also an den Endpunkten der schnellsten Strahlen aus.

§ 3. *Negative Resultate.* — Unsere ersten Untersuchungen an Glas- und Quarzplatten ergaben zunächst ein positives Resultat über die Ausbildung einer Erhebung auf der Rückseite der den Kanalstrahlen exponierten Platten. Obgleich durch die folgenden Beobachtungen sich dieses Resultat als Täuschung erwies, möchten wir kurz über die dabei gesammelten Erfahrungen berichten. Zur Feststellung einer etwaigen Erhebung auf der Rückseite wendeten wir zu Anfang gleich die oben angegebene Methode an. Da die Quarz- und Glasplatten eine so gute Politur besaßen, daß selbst eine ziemlich starke Vergrößerung keine Politurfurchen wahrnehmbar machte, so machten wir auf der Rückseite der Platte mit Tinte zwei Punkte, den einen auf die Projektion der Auftreffstelle auf die Rückseite in der Nähe ihres Randes, den anderen außerhalb derselben dicht daneben. Danach wurden die Tintenpunkte abgewischt; der Bezirk, auf dem sie gelegen hatten, wurde so in das Gesichtsfeld des Mikroskops gebracht, daß der Rand der Auftreffstelle mitten durch dasselbe ging; dann wurde auf die Tintenspuren

auf dem einen und auf dem anderen Punkte abwechselnd scharf eingestellt. Es ergab sich auf diese Weise eine Höhendifferenz von 0,02 bis 0,005 mm im Sinne einer Erhebung des über der Auftreffstelle liegenden Bezirkes über seine Umgebung. Ein dankenswerter Einwand, den Herr Professor Röntgen auf eine vorläufige Mitteilung unserer Beobachtungen machte, veranlaßte uns, die Ausdehnung der Erhebung interferometrisch zu untersuchen. Zu unserer Überraschung ergab diese verfeinerte Beobachtungsmethode auf den Glasplatten dicker als 0,5 mm und auf sämtlichen Quarzplatten auch nicht eine Andeutung einer Erhebung auf der Rückseite über der Auftreffstelle. Wir vermuteten nun den Grund des falschen positiven Resultates in folgendem Umstand. Über der Auftreffstelle der Kanalstrahlen auf der Rückseite der Platten mochte während der Exposition die Oberfläche etwas verändert, vielleicht etwas mehr geraut worden sein als ihre Umgebung, darum mochten dort die Tintenteilchen in einer etwas dickeren Schicht als hier festgehalten worden sein. Diese Vermutung über eine Veränderung der Oberfläche der Rückseite konnten wir bald für alle Platten bestätigen. War sie nämlich richtig, so mußte das Hauchbild auf der Rückseite unmittelbar nach der Exposition über der Auftreffstelle ein anderes Aussehen zeigen als in der Umgebung; oder es mußte bei gewissen Substanzen die Rauhung über der Auftreffstelle auf der Rückseite mikroskopisch sichtbar werden. Als wir die nach der Anordnung der Fig. 2 exponierten Platten behauchten, hob sich das Hauchbild über der Auftreffstelle in der Tat deutlich von der Umgebung ab. Und Flußspatplatten nahmen nach 2 Stunden Exposition auf der Rückseite über der Auftreffstelle eine eigenartige Rauhung an. Sie bedeckten sich nämlich mit einem sehr feinen eisblumenartigen Überzug. Unter dem Mikroskop erwies sich dieser als das wirre Geäst geradliniger Politurfurchen, und zwar hatten sich an die größeren Furchen seitlich in mehrfacher Verzweigung feinere und feinste Risse angesetzt; auch hatten sich längs der größeren Furchen unzählig viele Kristallsplitterchen zum Teil abgelöst. Abbildung 9 der Taf. VIII zeigt eine Mikrophotographie einer Partie der so veränderten Rückseite einer Flußspatplatte unmittelbar nach einer Exposition. Der feine Kristallstaub

auf der Rückseite der Flußspatplatten ließ sich mit einem weichen Tuche fortwischen; es blieben danach unter dem Mikroskop nur die durch die Exposition vergrößerten Politurrisse sichtbar.

Nun könnte man vermuten, daß die Rauhung der exponierten Platten auf der Rückseite von einer Abschleuderung von Molekülen infolge der Fortpflanzung des Stoßes der Kanalstrahlen herrühre. Indes ist diese Vermutung unrichtig. Wie Abbildung 9 (Taf. VIII) erkennen läßt (der Rand der Auftreffstelle ist mit kleinen Kreisen markiert), ist die Rauhung der Rückseite zwar unmittelbar über der Auftreffstelle am größten, sie setzt sich aber über deren Projektion hinaus fort und bricht da, wo die Bedeckung mit dem Aluminiumblech beginnt (durch kleine Kreuze markiert), rasch ab. Es war darum zu vermuten, daß die Rauhung nur an denjenigen Stellen der Rückseite auftritt, welche während der Exposition nicht mit einem Metallblech bedeckt sind. Zur Prüfung dieser Vermutung brachten wir in der beschriebenen dritten Anordnung (Fig. 3 der vorausgehenden Mitteilung) hinter der zu untersuchenden Platte eine schmale Klappe aus Eisenblech an, um das dünne Aluminiumblech herumgelegt war. Zum Zweck der Besichtigung der Platte während der Exposition konnte die Klappe mittels eines Elektromagneten zur Seite gezogen werden. Die in dieser Weise exponierten Flußspatplatten zeigten nun nach der Exposition weder die Rauhung noch ein ausgezeichnetes Hauchbild auf der Rückseite über der Auftreffstelle. Hieraus folgt, daß die Veränderung der Politur der Rückseite während der Einwirkung der Kanalstrahlen jedenfalls nicht eine ausschließliche Wirkung des Stoßes der Kanalstrahlen auf die Vorderseite sein kann. Sie mag durch eine chemische Wirkung des Gasinhaltes oder durch die mit der Spannung des Induktoriums wechselnde dielektrische Polarisation der untersuchten Platten bedingt sein. Eine nähere Untersuchung dieser Erscheinung mag interessante Resultate ergeben, ihre Weiterführung gehörte jedoch nicht zu der Aufgabe der vorliegenden Untersuchung.

Wie bereits mitgeteilt wurde, nehmen Quarzplatten, mögen sie senkrecht oder parallel zur optischen Achse geschnitten sein, bei einer Dicke von 0,2—2 mm auch nach einer vier-

stündigen Behandlung mit schnellen Wasserstoffstrahlen nicht die Spur einer Erhebung der Rückseite über der Auftreffstelle an. Dasselbe negative Resultat wurde an 0,8 mm dicken Kalkspatplatten erhalten, die senkrecht zur Hauptspaltungsebene geschnitten waren.

Das gleiche gilt von Glasplatten, die über 0,5 mm dick sind. Dünnere Glasplatten erfahren um so schneller, je dünner sie sind, 0,2 mm dicke Platten schon nach wenigen Minuten die in der vorausgehenden Abhandlung beschriebene Bläschenbildung an der Auftreffstelle der Kanalstrahlen; es wird dann der über dieser Stelle liegende Bezirk auf der Rückseite so weit herausgehoben, daß die interferometrische Untersuchung nicht mehr möglich ist. Diese Wirkung erklärt sich offenbar daraus, daß die Gasbläschen nach allen Seiten und so auch auf die Rückseite einen Druck ausüben und das erweichte Glas aus der Plattenebene herauschieben. Zumeist ist dieser Vorgang von der Ausbildung von Sprüngen begleitet.

Durchaus negative Resultate haben wir auch an 0,005 bis 0,8 mm dicken Metallplatten erhalten, untersucht wurden Platten von Stahl, Eisen, Aluminium, Platin, Kupfer.

§ 4. *Positive Resultate.* — *Steinsalz-* und *Sylvinplatten*, parallel einer Würfelfläche geschnitten, 0,8—1 mm dick, zeigen bereits nach 30 Min. Behandlung mit Wasserstoffstrahlen aus einem Kathodenfall größer als 5000 Volt eine deutliche Erhebung auf der Rückseite über der Auftreffstelle. Läßt man das Bild eines geraden Glühlampenfadens über die Rückseite der Platte wandern, so legt sich eine Krümmung in das Fadenbild, wenn die Reflexionsstelle den Bezirk über der Auftreffstelle passiert. Nach der interferometrischen Methode untersucht zeigt die Rückseite eine Erhebung über der Auftreffstelle und zwar setzt sich diese in kontinuierlichem Übergang auch über die Projektion der Auftreffstelle hinaus in die Umgebung fort. Eine genaue Ausmessung der Erhebung auf der Rückseite ist uns bei Steinsalz- und Sylvinplatten nicht gelungen. Durch das Auflegen bzw. Andrücken der planparallelen Glasplatte nach der Interferenzmethode werden nämlich die Platten leicht verbogen; auch ist die Erhebung bei ihnen so groß, daß es schwer hält, die Glasplatte symme-

trisch auf die Erhebung ohne Abgleiten aufzulegen, und daß der beträchtliche Unterschied in der Streifenbreite innerhalb und außerhalb der Erhebung einen genauen Vergleich unmöglich macht. Um uns wenigstens über die Größenordnung der höchsten Erhebung zu orientieren, verfahren wir in folgender Weise. Ein horizontal gespannter Platindraht wurde auf Rotglut elektrisch erhitzt, in etwa 10 cm Abstand von ihm wurde etwas tiefer die zu untersuchende Platte auf das Okular eines Mikroskops aufgelegt; auf das von der Plattenfläche entworfene Drahtbild wurde mit einem etwa 2 m entfernten Fernrohr scharf eingestellt. Im Reflexionsbild erschien dann der Draht rechts und links neben der Erhebung linear und scharf, am Ort der Erhebung selber verbogen und unscharf. Durch Drehen der Mikroskopschraube (1 Teil = 0,01 mm) konnte dann die Stelle stärkster Verbiegung (maximale Erhebung) in das Fadenkreuz geführt werden. Wir erhielten so für eine Sylvinplatte, die etwa 30 Min. mit raschen Wasserstoffstrahlen behandelt worden war, eine maximale Erhebung von ungefähr 0,03 mm, für eine mit Hg-Strahlen behandelte Steinsalzplatte eine Erhebung von ungefähr 0,07 mm. Diese Zahlen geben indes nur die Größenordnung richtig an.

Wird eine Steinsalz- oder Sylvinplatte nach Ausbildung der ersten deutlich wahrnehmbaren Erhebung noch längere Zeit sehr schnellen Strahlen ausgesetzt, so wächst die Erhebung weiter und ausgehend von dem am stärksten gerauhten Bezirk auf der Auftreffstelle bilden sich dann Risse in der Platte aus.

Flußspatplatten, 0,8—1 mm dick, senkrecht zur Hauptsplattungsebene geschnitten, erfahren durch langsame Wasserstoffstrahlen keine Erhebung auf der Rückseite, wohl aber durch schnelle Strahlen (Kathodenfall größer als 10000 Volt) nach einer Exposition von mehr als 2 Stunden. Nach der interferometrischen Methode untersucht, erweist sich die Erhebung auf der Rückseite nur wenig größer als die Projektion der Auftreffstelle und zwar hat die Erhebung ihren Gipfel immer über der muldenförmigen Vertiefung, welche die schnellsten Strahlen in die Auftreffstelle auf der Vorderseite gegraben haben. In zwei von drei Fällen sprang die Platte

nach 2—3 Stunden Exposition und zwar ging der Sprung immer durch die Stelle stärkster Erhebung. Die größte Erhebung betrug 0,5—3 Wellenlängen des Natriumlichtes.

Eine *Kalkspatplatte*, 0,8 mm dick, senkrecht zur Hauptspaltungsebene geschnitten, zeigte nach zweistündiger Behandlung mit sehr schnellen Wasserstoffstrahlen noch keine Erhebung auf ihrer Rückseite. Dagegen konnten wir an einer 1 mm dicken, senkrecht zur optischen Achse geschnittenen Platte über der Auftreffstelle der schnellsten Strahlen eine deutliche Erhebung nach einer dreistündigen Exposition feststellen.

Bemerkenswert erscheint noch folgende Beobachtung über die Ausdehnung der Erhebung auf der Rückseite der untersuchten Kristallplatten. Die Erhebung beschränkt sich nämlich mit ziemlicher Annäherung auf die Projektion der Auftreffstelle auf die Rückseite. Dies zeigen vor allem länger exponierte Steinsalzplatten; läßt man das Bild eines geradlinigen Glühlampenfadens, der dicht an die Platte gehalten wird, über deren Rückseite wandern, so erscheint die Krümmung in ihm erst bei seinem Übertritt in das Gebiet der Projektion der Auftreffstelle; dicht neben diesem Gebiete ist sie nur schwach oder gar nicht vorhanden. Auch an zwei Flußspatplatten konnte festgestellt werden, daß die Auspressung auf der Rückseite mit Annäherung auf die Projektion der Auftreffstelle auf die Rückseite sich beschränkt. Eine derartige Übereinstimmung des Gebietes der Auspressung mit jener Projektion ist natürlich dann nicht zu erwarten, wenn die schnellen Kanalstrahlen die ihnen dargebotene Auftreffstelle nicht ganz ausfüllen, sondern eine auspressende Wirkung nur in einem kleinen Bezirk rings um ihre Achse ausüben. Diesen Fall haben wir an zwei Beispielen für Flußspat erhalten.

§ 5. *Erklärungsversuche.* — Um die Erscheinung zu erklären, daß sich eine geringe Erhebung auf der Rückseite von etwa 1 mm dicken Platten aus Steinsalz, Sylvin, Flußspat und Kalkspat über der Auftreffstelle von Wasserstoffkanalstrahlen auf der Vorderseite ausbildet, mag man zunächst folgende Überlegungen anstellen.

Durch die elektrische Aufladung der Auftreffstelle der Kanalstrahlen bildet sich zwischen dieser Stelle und den

späteren Kanalstrahlen eine abstoßende Kraft aus. Indes ist, wie bereits in der vorausgehenden Abhandlung dargelegt wurde, die Aufladung einer isolierenden Fläche als Basisfläche eines Kanalstrahlenbündels infolge der Gasionisierung bei solchen Drucken nur sehr klein, bei welchen die Kanalstrahlen auf ihrem Weg das Gas noch zum Leuchten bringen.

Weiter könnte man vermuten, daß das Kanalstrahlenbündel infolge der Änderung seiner Bewegungsgröße an der Auftreffstelle eine beträchtliche mechanische Kraft auf diese ausübt. Indes ist auch dies nicht der Fall, wie eine einfache Rechnung zeigt. Angenommen nämlich, die Wasserstoffstrahlen hätten 15000 Volt Kathodenfall durchlaufen, ihre einfallende Stromstärke auf die Auftreffstelle betrage 1 Milliamp. und nach dem Auftreffen würden sie normal mit umgekehrter Geschwindigkeit zurückgeworfen, so berechnet sich selbst unter diesen günstigsten Annahmen nur eine sekundliche Änderung der Bewegungsgröße und somit eine Kraft von ungefähr 1 Dyne auf die Auftreffstelle.

Übrigens würde eine mechanische Kraft auf die Auftreffstelle, welche zur Auspressung der Erhebung auf der Rückseite ausgereicht hätte, die Platten leicht aus ihrer losen Befestigung auf der Rückseite der Kathode herausgedrückt haben.

Als nächster Grund der beobachteten Erscheinung kam die Deformation infolge ungleichmäßiger thermischer Ausdehnung in Betracht. Nachdem im Gegensatz zu den ersten fehlerhaften Beobachtungen die interferometrische Methode ergeben hatte, daß die Ausdehnung der Erhebung etwas größer als die Projektion der Auftreffstelle ist, mußte dieser Erklärungsversuch ernsthaft geprüft werden. Es wurde zu diesem Zweck ein dünner Platindraht zu einem Kreis von 2 mm Durchmesser gebogen, die kurzen senkrecht dazu stehenden Enden in dicken Messingdrähten befestigt; der kleine Kreis wurde horizontal gestellt und, nachdem eine zuvor interferometrisch geprüfte Flußspat- bzw. Steinsalzplatte auf ihn aufgelegt war, wurde er so stark mit elektrischem Strom beschickt, daß sein Glühen im verdunkelten Zimmer eben wahrnehmbar war. Eine stärkere Erwärmung vertrugen die Platten nicht ohne zu springen. Obwohl nun die Platten in dieser Weise 4, 7 oder 18 Stunden

exponiert wurden, zeigten sie danach auf ihrer Rückseite ebensowenig eine Erhebung wie zuvor. Da in diesem Versuch die ungleichmäßige Erwärmung, welche die Kristallplatten bei der Behandlung mit Kanalstrahlen erfuhren, etwas übertrieben nachgeahmt wurde und das Resultat hinsichtlich der Erhebung auf der Rückseite negativ war, so ist zu schließen daß die beobachtete Erhebung infolge der Wirkung der Kanalstrahlen ihre Ursache nicht in einer Deformation infolge ungleichmäßiger Erwärmung haben konnte.

Endlich stellten wir folgende Überlegung an. Durch das Eindringen der Wasserstoffstrahlen an der Auftreffstelle in den Kristall wird ein Druck nach allen Seiten und so auch in der Richtung nach der Rückseite der Platte ausgeübt; wie dieser auf der Vorderseite zu einem Absplittern kleiner Stückchen von der Auftreffstelle führt, so mag er auf der Rückseite eine kleine Erhebung auspressen. Diese Überlegung schien uns so viel Wahrscheinlichkeit zu haben, daß wir die Untersuchungen über die Ausbildung einer Erhebung auf der Rückseite zurücktreten ließen und erst die Untersuchungen über das Eindringen von Kanalstrahlen in feste Körper durchführten, über welche in der vorausgehenden Abhandlung berichtet ist. Wenn wir indes jetzt alle unsere Resultate zusammenhalten, so kommen wir zu dem Schluß, daß auch die vorstehende Überlegung nicht richtig sein kann. Denn bei Flußspatplatten ist die Rauhung der Auftreffstelle der Kanalstrahlen kaum wahrnehmbar und doch ist die Erhebung auf der Rückseite deutlich ausgebildet. Da, wie sich ergeben hatte, Quecksilberkanalstrahlen keine Rauhung der Auftreffstelle hervorbringen, so untersuchten wir, ob sie ebenfalls eine Erhebung auf der Rückseite bewirken. Nun zeigten zwei Flußspatplatten, welche mit Quecksilberkanalstrahlen behandelt worden waren, in der Tat keine deutliche Erhebung auf der Rückseite; indes waren sie, wie aus dem Fehlen der oben erwähnten muldenförmigen Vertiefung zu schließen war, fehlerhaft exponiert. Dagegen wies eine 2 mm dicke von Zeiss stammende Flußspatplatte, welche zufällig unter sehr günstigen Bedingungen 3 Stunden lang exponiert war, sowohl die muldenförmige Vertiefung auf der Vorderseite wie eine deutliche Erhebung darüber auf der Rückseite auf. Ferner nahm eine Steinsalzplatte

unter der Wirkung der Quecksilberkanalstrahlen ohne gleichzeitige Rauhung der Vorderseite eine Erhebung auf der Rückseite an, welche an der Krümmung des Bildes eines geradlinigen Glühlampenfadens beobachtet werden konnte.

Wenn wir nun auch die vorstehenden Versuche zur Erklärung der beschriebenen Erscheinung nicht als haltbar erachten, so möchten wir in ihr doch auch nicht eine Bestätigung der theoretischen Überlegungen erblicken, welche den Ausgangspunkt unserer experimentellen Untersuchungen bildeten; denn man wird es wohl nicht für möglich halten, daß sich der dissoziierende Stoß von Kanalstrahlen in Kristallen bis zu 1 mm Tiefe fortpflanzt.

Aachen, Physik. Institut der Technischen Hochschule,
20. April 1912.

(Eingegangen 25. April 1912.)