

Die physikalischen Eigenschaften der Krystalle.

Von Prof. Dr. Zech.

Im letzten Jahrgange dieser Jahrbücher habe ich eine kleine Abhandlung von Nörrenberg über das optische Verhalten von Krystallen, die sich in verschiedenen gemischten Lösungen von Kali- und Ammoniakseignettesalz bilden, veröffentlicht. Nörrenberg wollte damit einen Beitrag geben zu den Studien über die molekulare Zusammensetzung der Körper, in ähnlicher Weise, wie er früher zu gleichem Zweck das optische Verhalten verschieden combinirter Lagen von Glimmer- und Gipsblättchen untersuchte. Ich habe mir die Aufgabe gestellt, nach den Originalpräparaten, die das physikalische Cabinet der polytechnischen Schule besitzt, Mittheilungen über die erhaltenen Resultate zu machen, möchte aber ausserdem noch hier in Kurzem Alles zusammenstellen, was in der neuern Zeit über das physikalische Verhalten der Krystalle bekannt wurde, so weit mir die betreffende Literatur zu Gebot steht; ich hoffe damit einigen Lesern dieser Hefte einen Dienst zu erweisen und zugleich die Resultate jener optischen Untersuchungen klarer darlegen zu können.

Der jetzige Standpunkt der Physik lässt sich mit dem der Astronomie zu Keplers Zeiten vergleichen. Wie damals die vielfachen Bewegungen der Himmelskörper innerhalb unseres Planetensystems, die man früher auf sehr verschiedene, aber immer ungenügende Weise zu erklären suchte, durch Kepler auf drei allgemeine Gesetze zurückgeführt wurden, so stellten im Laufe unseres Jahrhunderts die Physiker eine Reihe einzelner Gesetze auf, welche zur Erklärung einer Zahl von zusammenhängenden,

einem bestimmten Gebiete der Physik angehörenden Erscheinungen und Beobachtungen ausreichend sind. Ich erinnere hier an die Theorie der unter den Namen Interferenz, Beugung und Polarisation bekannten Lichterscheinungen, eine Theorie, die schon von Huyghens aufgestellt, von Young weiter geführt und von Fresnel vorläufig zum Abschluss gebracht wurde, eine Theorie, die jetzt so weit ausgebildet ist, dass das ganze Kapitel der Optik nun ein in all seinen Theilen fest verbundenes, auf dem Grunde der Gesetze der Aetherschwingungen aufgerichtetes Gebäude vorstellt. In fortlaufendem Zusammenhang damit bildete sich die Theorie der Elasticität aus, da auf ihren Grundsätzen eben die Gesetze der Aetherschwingungen beruhen, so dass man sagen kann, die Optik als Lehre von den Schwingungen, die auf der Elasticität des Aethers beruhen, sei bloß noch ein Theil der Elasticitätslehre, ganz in derselben Weise wie die Akustik als Lehre von den Schwingungen der Lufttheilchen und der diese Schwingungen hervorbringenden Körper. Die magnetischen Erscheinungen, namentlich in Beziehung auf den Erdmagnetismus, sind von Gauss nach allen Seiten hin erforscht und theoretisch festgestellt worden. Die Beziehungen zwischen Magnetismus, Elektrizität und Galvanismus haben Ampère und Weber zu bestimmen gesucht: Weber hat ein Gesetz für die Einwirkung zweier kleiner Stromtheile gegeben, das allerdings mit unsern gewöhnlichen mechanischen Vorstellungen nicht in Einklang zu bringen ist, aber über alle beobachteten Erscheinungen, die hieher gehören, ausreichende Auskunft gibt und auch auf Magnete Anwendung findet, wenn man annimmt, dass um jedes Molekül eines Magnets ein kleiner galvanischer Strom von bestimmter Richtung sich bewege. Doch widerspricht das Gesetz den bekannten Erscheinungen der Anziehung und Abstossung der durch Reibungselectricität elektrisch gemachten Körper, wenigstens wenn man bloß das elektrische Fluidum als Sitz der Anziehung oder Abstossung betrachtet. In der neuesten Zeit sind es die Wärmereischeinungen, die immer mehr unter einzelne Gesetze zusammengefasst werden in der „mechanischen Wärmetheorie“, welche die Wärme nicht als Stoff, als Imponderabile, sondern als Bewegung

sei es der Aether-, sei es der Körperatome betrachtet. Auch werden immer wieder Bemühungen gemacht, schon jetzt überhaupt alle physikalischen Erscheinungen aus den Schwingungen der Aetheratome abzuleiten, doch kann man wohl sagen, dass ein nennenswerthes Resultat dabei noch nicht erreicht worden ist.

Was ist nun das allgemeine Princip der Physik, das schliesslich gefunden werden muss, wie die Theorie der allgemeinen Gravitation in der Astronomie, oder wenn wir diese Frage noch nicht beantworten können, was wird der Weg sein, um schliesslich die Auffindung zu beschleunigen? und was haben die Physiker gewonnen, wenn sie diesen Weg glücklich zurückgelegt haben? Antwort auf diese Frage gibt uns eine Fortführung des Vergleichs zwischen dem jetzigen Gang der Astronomie und dem zukünftigen der Physik. Newton vereinigte die drei Kepler'schen Gesetze unter dem einen der allgemeinen Gravitation, indem er die Bewegung des Monds um die Erde mit dem Fall eines Körpers gegen die Erde verglich, und nachdem er gefunden hatte, dass beide Bewegungen demselben Gesetze folgen, dieses Gesetz ohne Weiteres und wie die Folge zeigte, mit Recht auf alle Weltkörper ausdehnte. In ähnlicher Weise glaubt der Nestor der französischen Physiker, Lamé, das letzte Princip der Physik müsse durch Vereinigung der bis jetzt als gültig anerkannten Einzeltheorien, durch Aufsuchung des ihnen allen Gemeinsamen gefunden werden, und — um diesen Weg zu vereinfachen — schliesst er vorerst die Theorien aus, die seit lange abgeschlossen keinen Schritt vorwärts mehr machen, z. B. die Theorie der magnetischen Erscheinungen von Gauss, und glaubt nur bei denjenigen stehen bleiben zu müssen, die in unserer Zeit noch fort und fort sich erweitern und damit auch vereinfachen, also die Theorie der Wärme und die der Elasticität, womit die des Lichts zusammenfällt. Sei es, dass auf diesem oder einem andern Weg das letzte Princip der Physik gefunden werde; von dem Augenblick an, wo es gefunden ist, beginnt eine neue Epoche der Physik, wie früher in der Astronomie. Nachdem das allgemeine Gesetz der Gravitation aufgestellt war, ergaben sich aus ihm die Kepler'schen Gesetze, zugleich aber auch Abweichungen

der wirklichen Bewegung von der durch jene Gesetze bestimmten, Abweichungen, die Kepler noch nicht bekannt waren, weil die Beobachtungen jener Zeit noch nicht genau genug waren — wir können sagen glücklicherweise, weil sonst seine Arbeit eine noch viel mühevollere gewesen und möglicherweise gar nicht zu Ende geführt worden wäre. Newton's Gesetz führt zu dem Schlusse, dass kein Planet eine so einfache krumme Linie zur Bahn hat, wie die Ellipse ist: es könnte diess nur der Fall sein, wenn der Planet nebst der Sonne ganz allein im Raume vorhanden wäre, und nur für diesen idealen Fall gelten die Kepler'schen Gesetze in ihrer ganzen Strenge. So wie noch ein dritter Körper vorhanden ist, so wirkt dieser auf den Planeten anziehend, wird ihn also mehr oder weniger von der elliptischen Bahn entfernen. Hätten die drei Körper ungefähr gleiche Massen, so wären unsere beschränkten mathematischen Kenntnisse nicht im Stande, die Frage zu lösen, welche Bahn jeder derselben beschreibt. Glücklicherweise — können wir wieder sagen — herrscht die Masse der Sonne in unserem Planetensystem so vor, dass im Vergleich zu ihrer Einwirkung auf einen Planeten alle andern Einwirkungen sehr kleine Grössen sind. Jeder Planet beschreibt also nahezu eine elliptische Bahn und die Einwirkung aller andern Planeten zeigt sich nur darin, dass jener immer und immer wieder ein klein wenig von der Ellipse abweicht, bald nach aussen bald nach innen, je nach der Stellung der andern Planeten. Diese Abweichungen nennt der Astronom „Störungen“, ein Wort, das vielleicht nicht ganz passend gewählt ist, jedenfalls schon zu Ausfällen gegen die jetzige Astronomie geführt hat. Störungen sind Ausnahmen von einem Naturgesetz, sagt man, wie kann die Astronomie, die von einem höchsten Grundsatz ausgeht und durch denselben alles erklären will, solche annehmen? In diesem Sinn fasst der Astronom natürlich das Wort nicht, es bedeutet für ihn nur die Abweichung von den einfachen Bewegungen, welche die Kepler'schen Gesetze geben, während sie auf der andern Seite gerade Ausflüsse des allgemeinen Gesetzes sind, und es ist nur eine Erleichterung der Rechnung, wenn man zuerst die einfachen Kepler'schen Gesetze zur Bahnbestimmung zu

Grund legt und den gefundenen Ort durch die berechneten Störungen corrigirt. Solcher Störungen wurden alsbald nach Aufstellung des Gravitationsgesetzes eine ganze Reihe berechnet und durch die Beobachtung bestätigt, und die grosse Ausbildung der Störungsrechnung machte es Leverrier, als er die Bahn des Uranus genauer untersuchte, möglich, nicht nur zu behaupten dass noch ein weiterer störender Körper vorhanden sein müsse ausser den bisher bekannten, sondern sogar diesem neuen Körper — dem Planeten Neptun — seinen Ort anzuweisen, ehe er noch beobachtet worden war.

Auch in der Physik dürfen wir demnach hoffen, dass nach Auffindung des letzten Princips solche Störungen — Abweichungen von den jetzt bekannten Gesetzen — erklärt werden, wo wir sie schon gefunden haben, oder erst nachgewiesen werden, und möglicherweise auf ganz neue noch nicht beobachtete That-sachen hinweisen. Es gibt in der Physik eine Reihe von Gesetzen, die bei verschiedenen Körpern ihre Störungen haben. Das Mariottische Gesetz über den Zusammenhang von Druck und Volumen eines Gases erleidet Störungen, wenn der Druck so gross wird, dass sich das Gas dem Uebergang in den flüssigen Zustand nähert; das GayLussac'sche über die Ausdehnung der Gase durch Temperaturerhöhung ist nicht vollkommen richtig bei verschiedenen Gasen; ebenso das Gesetz, dass gleiche Volumina verschiedener Gase gleich viel Wärme zu einer bestimmten Temperaturerhöhung nöthig haben, ferner das Dulong'sche Gesetz über Zusammenhang der specifischen Wärme und des Atomgewichts. In andern Fällen gelten die aufgestellten Gesetze nur innerhalb bestimmter Grenzen, z. B. das Grundgesetz der Elasticität, dass die Verlängerung oder Verkürzung eines Stabs dem Zug oder Druck proportional sei, der auf ihn ausgeübt wird. Wieder in andern Fällen kennen wir nur ein Gesetz für einen bestimmten Aggregationszustand, z. B. eben das erwähnte GayLussac'sche über die Ausdehnung der Gase, während für flüssige und feste Körper kein solches allgemeines Gesetz bekannt ist, vielmehr die Ausdehnung für jeden Körper besonders bestimmt werden muss. Es genüge an diesen Beispielen,

um zu zeigen, wie weit sich die künftige Physik noch auszudehnen hat, um alle diese Störungen zu beseitigen oder die noch unbekanntes Gesetze zu finden.

Ich greife noch einmal zurück auf die Vergleichung mit der Astronomie: Durch Ausdehnung des allgemeinen Gravitationsgesetzes auch auf Körper ausserhalb unseres Sonnensystems hat man nicht nur die gegenseitigen Bewegungen der Doppelsterne bestimmt, es ist auch Bessel gelungen, aus der kleinen Bewegung des Sirius nachzuweisen, dass dieser einen dunkeln, nicht leuchtenden Begleiter haben müsse, und hat diesem Begleiter seinen Ort angewiesen. Bessel hielt ihn für dunkel, weil zu seiner Zeit die Fernröhren nicht stark genug waren, ihn aufzufinden; seitdem ist er als schwach leuchtender Punkt aufgefunden worden und eine mehrjährige Beobachtung hat gezeigt, dass er sich Bessels Formeln willig fügt — eine Thatsache, die viel weniger bekannt ist, als die Entdeckung des Neptun, ihr aber in Beziehung auf Grossartigkeit zum wenigsten ebenbürtig ist. Ebenso mag, wenn nach Lamé das Grundprincip der Physik aus der Vereinigung der Wärmelehre und Elasticitätstheorie gefunden ist, dasselbe doch auch seine Anwendung auf die andern Gebiete finden, vielleicht ganz neue auffinden lassen, wie der Galvanismus in den letzten hundert Jahren neu auftauchte.

Neben Lamé's Ansicht über den Weg zur Auffindung des letzten Principes der Physik macht sich eine andere mit Recht geltend. Sie geht davon aus, dass die meisten physikalischen Gesetze, soweit sie jetzt fertig sind, auf die Molekulartheorie sich gründen, welche annimmt, dass jeder Körper aus kleinsten Theilen, Körperatomen, bestehe, von denen jedes mit einer Hülle oder Atmosphäre von Aetheratomen umgeben sei. Werde diese Theorie weiter ausgebildet, erfahren wir Näheres über die gegenseitige Lage der Körperatome, über die Art ihrer Bewegung und der Bewegung ihrer Aetherhüllen, so nähere man sich dem Grundprincip der Physik, eben weil eine Reihe der verschiedensten Erscheinungen schon aus der Bewegung der Atome erklärt wurden. Nach der Wärmetheorie ist Wärme nichts Anderes als Bewegung der Aetherhüllen der Körperatome: bei erhöhter Tem-

peratur wird die Bewegung der Aetherhüllen lebhafter, sie stossen stärker auf die Körperatome, es entsteht ein grösserer Druck zwischen den einzelnen Körperatomen, die Resultate aller der einzelnen Stosskräfte, die in Folge der Bewegung entstehen; es kann also auch nicht mehr Gleichgewicht bestehen, bis eine Entfernung der Körperatome stattgefunden hat, womit die Zahl der Stösse abnehmen wird; jene Entfernung der Körperatome von einander ist aber eben das, was wir als Resultat der Wärme beobachten: die Ausdehnung der Körper. Die Wärmestrahlung wird blos durch Aetherschwingungen vermittelt, so die Wärmezufuhr von der Sonne zur Erde, denn auf dem grössten Theil des Wegs zwischen beiden müssen wir annehmen, dass keine Körperatome sich befinden: erst wenn diese Aethersehwingungen einen Körper, sei er gasförmig, flüssig oder fest, treffen, setzen sie auch die Aetherhüllen der Atome dieses Körpers und damit die Atome selbst in Bewegung und nun erst erfolgt die Ausdehnung, die uns allein direkten Aufschluss über Temperaturzunahme gibt. Die Lichterscheinungen weisen darauf hin, dass ausser den Aetherhüllen noch freier Aether zwischen den Molekülen sich befindet, solcher, der nicht genöthigt ist, mit den Molekülen zu schwingen. Nimmt man nemlich blos auf die Moleküle und ihre gegenseitige Anziehung Rücksicht und wendet darauf die Theorie der Elasticität an, so findet man für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts in durchsichtigen Körpern einen Ausdruck, der von der Wellenlänge, also von der Farbe unabhängig ist: es würden also die verschiedenfarbigen Strahlen gleich gebrochen werden, das in einem Prisma, in einer Linse gebrochene Sonnenlicht wäre nicht farbig. Nimmt man dagegen an, dass zwischen den Molekülen mit ihren Aetherhüllen noch freier Aether sich befindet, so findet die Theorie, dass die Geschwindigkeit des Lichts mit der Wellenlänge abnimmt, wie die Erfahrung längst gezeigt hat, dass das rothe Licht sich schneller fortpflanzt als das gelbe, grüne u. s. w.

Diese Beispiele zeigen, dass richtige Vorstellung über die molekulare Constitution der Körper in manchen Fällen zu richtigen Erklärungen führen könne. Es wird also wohl der Mühe

werth sein, möglichst viele Thatsachen und Beobachtungen zu sammeln, um Aufschluss über die Vertheilung der Moleküle im Innern eines Körpers zu erhalten. Die erste Rolle spielen hierbei die Krystalle, weil bei ihnen die innere Beschaffenheit in engster Verbindung mit der äussern Form steht, und weil bei ihnen die physikalischen Eigenschaften nach verschiedenen Richtungen durch verschiedene Zahlen bestimmt sind, so dass eine Abhängigkeit dieser Zahlen von der äussern Form und innern Beschaffenheit eher wird ermittelt werden können. Ausgeschlossen sind nur die Krystalle des regulären Systems, weil bei diesen, wie bei den unkrystallinischen Körpern, in physikalischer Beziehung keine Richtung vor einer andern ausgezeichnet ist.

In einem unkrystallinischen und ebenso in einem regulär krystallisirten Mittel pflanzt sich die Wärme, das Licht, die Electricität nach allen Richtungen gleich schnell fort, sie dehnen sich durch Wärmezufuhr oder einen ausgeübten Zug nach allen Richtungen gleich stark aus. Denkt man sich aus einem solchen Mittel eine Kugel gebildet, so wird diese bei der Erwärmung eine Kugel bleiben nur mit grösserem Halbmesser: sie wird, wenn sie etwa unter Wasser einem allseitigen hohen Druck ausgesetzt wird, zu einer Kugel mit kleinerem Halbmesser werden. Wenn im Mittelpunkt der Kugel eine Wärmequelle, eine Licht- oder Electricitätsquelle sich befindet, so pflanzen sich Wärme, Licht und Electricität so fort innerhalb der Kugel, dass jede in einer bestimmten Zeit alle Punkte der Kugeloberfläche zugleich erreicht. Die Kugeloberfläche, die in sich verschiebbar, nach allen Seiten hin gleich ist, ist somit das Symbol der unkrystallinischen oder regulär krystallisirten Körper. Für die andern Krystalle wird an ihre Stelle eine andere Fläche treten und zwar in den meisten Fällen eine von der Kugel wenig verschiedene, wie die Beobachtung zeigt. In erster Annäherung, solange man noch von Störungen absieht, kann man für diese andere Fläche die an Einfachheit der Kugeloberfläche zunächst stehende, nemlich das Ellipsoid nehmen und zusehen, wie weit diese Annahme passt, ganz in derselben Weise, wie wir der Erde eine ellipsoidische Gestalt zuschreiben, indem wir von den Erhebun-

gen über die Meeresoberfläche — und das sind hier die Störungen — absehen. Dieses Ellipsoid kann ein Umdrehungsellipsoid sein wie die Erde, oder eines mit drei verschiedenen Axen. Wir denken uns zunächst eines mit drei Axen. Ist diese Annahme zulässig, so gibt es also in jedem Krystall drei Hauptrichtungen — sie sollen allgemein „Axen“ heissen — die den innern Zusammenhang bedingen. Legt man durch irgend zwei dieser Axen eine Ebene, so ist diess eine Symmetralebene, zu deren beiden Seiten alles gleichmässig angeordnet ist, als ob die eine Hälfte die wir uns etwa hinter der Symmetralebene denken wollen, ein Spiegelbild der vordern, in der Symmetralebene als Spiegel gesehen, wäre. Durch jede Axe gehen zwei solcher Symmetralebenen, also gibt es im Ganzen drei; sie stehen natürlich auf einander senkrecht, wie die Axen auch. Vermöge der Homogenität, der Unterschiedslosigkeit der Masse an verschiedenen Stellen, können wir uns die Axen durch einen beliebigen Punkt des Krystalls gelegt denken, ihre Bedeutung ändert sich dadurch nicht, die Richtungen bleiben dieselben. Die Erfahrung hat gezeigt, dass wir mit dieser Annahme der Homogenität und der drei zu einander rechtwinkligen Symmetralebenen ausreichen, um eine Reihe physikalischer Erscheinungen zu erklären, so lange wir bei den einfachsten Krystallssystemen, dem viergliedrigen, dreigliedrigen und zwei- und zweigliedrigen stehen bleiben. Dagegen scheint es sehr zweifelhaft, ob bei den zwei übrigen Krystallssystemen, den zwei- und eingliedrigen und den ein- und eingliedrigen drei zu einander senkrechte Symmetralebenen für die Anordnung der Moleküle vorhanden sind: die krystallographische Form hat ja auch nur eine Symmetralebene beim vorletzten, gar keine beim letzten System. Ueber das Verhalten dieser Krystalle hat man wenig Beobachtungen, am meisten noch aus dem Gebiete der Optik.

Eine Schwierigkeit, die bei diesen Krystallen (siehe später die Untersuchungen von Angstrom über den Gyps) hinzutritt, ist die, dass der Aether im Innern des Körpers eine andere Vertheilung zu haben scheint, als die Körperatome, und darauf deuten auch die optischen Untersuchungen hin, nach welchen ein

und derselbe Krystall für eine Farbe optisch einaxig ist, für die andern optisch zweiaxig, d. h. dass die Lichtgeschwindigkeit im ersten Fall nach allen zu einer Hauptrichtung symmetrisch liegenden Richtungen dieselbe ist, im zweiten Falle dagegen nicht, dass die Elasticität, soweit sie die Lichtschwingungen bedingt, im ersten Fall durch eine Umdrehungsellipsoid, im zweiten durch ein drei-axiges Ellipsoid vorgestellt ist. Ich komme später auf diesen Fall noch besonders zu sprechen. Eine weitere Schwierigkeit, die auch schon bei den einfacheren Krystallen auftritt, ist die, dass bis jetzt die Bedeutung der Blätterdurchgänge für die Anlagerung der Moleküle ganz unbekannt ist. Bei akustischen und magnetischen Versuchen scheinen sie von wesentlicher Bedeutung zu sein, während die optischen und thermischen Erscheinungen, auch die der Ausdehnung, keine Beziehung zu ihnen haben. Die Spaltbarkeit mit den drei Symmetralebenen in Verbindung zu bringen, ist bis jetzt nie versucht worden: wenn man bloss die Homogenität und symmetrische Anordnung zu drei unter sich senkrechten Ebenen als hinreichend zur Erklärung derselben annehmen wollte, würde man z. B. bei den vier- und dreigliedrigen Krystallen immer unendlich viele Spaltungsrichtungen finden, statt der immer vorkommenden begrenzten Zahl.

So lange man nur die einfachern Krystalle betrachtet, kann man erfahrungsgemäss annehmen, dass die innere Vertheilung des Aethers in einem Krystall, der der Moleküle analog ist. Man macht die Voraussetzung, dass bei der Störung des Gleichgewichts, bei Annäherung oder Entfernung der Moleküle Kräfte entstehen, welche die Moleküle wieder in die frühere gegenseitige Lage zurückzuführen streben, und dass diese Kräfte der Aenderung der Entfernung proportional seien. Wenn nun die Moleküle zu drei Ebenen symmetrisch sind, so wird diess auch bei den entstehenden Kräften und deren Wirkungen sein. Man kann einen solchen Zustand auch in einem nicht krystallinischen Körper künstlich hervorbringen, indem man einen Druck auf denselben nach bestimmter Richtung ausübt: man kann auf diese Weise einen das Licht einfach brechenden Körper zu einem doppelt brechenden, einen optisch einaxigen zu einem optisch zwei-

axigen machen, man kann das magnetische oder diamagnetische Verhalten eines Krystalls durch ein Modell nachahmen, das aus einer Masse gefertigt ist, welche nach einer Richtung stark, nach einer dazu senkrechten Richtung schwächer, und nach der auf diesen zwei senkrechten Richtung gar nicht gepresst worden ist. Es geht daraus hervor, dass bloß verschiedene Entfernung der Moleküle von einander nach drei zu einander senkrechten Richtungen hinreicht, die betreffenden Erscheinungen zu erklären. Und es ist ferner klar, dass in solchen Fällen die Elasticitätsaxen, die thermischen Axen und die krystallographischen Axen zusammenfallen müssen.

Die Elasticitätsaxen beziehen sich auf zweierlei Erscheinungen, die Dehnung und Biegung eines Körpers und auf die optischen Eigenschaften. Die Theorie ist für beide, wie oben schon bemerkt wurde, dieselbe; um Verwechslungen zu vermeiden, will ich die Elasticitätsaxen, sofern sie der optischen Erscheinung zu Grund liegen, Polarisationsaxen nennen („optische Axen“ hat schon für sich eine bestimmte Bedeutung). Die Elasticitätsaxen hängen von der Vertheilung der Körperatome ab, die Polarisationsaxen von der Vertheilung des Aethers im Körper, sie werden also nur zusammenfallen, soweit die Vertheilung des Aethers der der Körperatome analog angenommen werden kann. Auch bei den Elasticitätsaxen kann man noch zwei Arten unterscheiden; man denke sich aus einem Körper dünne Stäbchen nach allen möglichen Richtungen geschnitten; darunter wird es eines geben, das sich am leichtesten, eines, das sich am schwersten biegen lässt, das erste entspricht der kleinsten, das zweite der grössten Elasticitätsaxe für Biegung und senkrecht zu beiden steht die mittlere Elasticitätsaxe. Wir werden diese Axen bei den Klangfiguren kennen lernen, welche aus einem Krystall geschnittene Scheiben beim Tönen zeigen. Dieselben Stäbchen werden auch wenn sie gleich stark gezogen werden, am stärksten oder am schwächsten sich ausdehnen. Es wird aber nicht nöthig sein, desswegen noch eine weitere Abtheilung zu machen, weil aus mechanischen Gründen die Axen für Dehnung und die für Biegung unter allen Umständen zusammenfallen müssen. Die

Axen für Ausdehnung und also auch Zusammenziehung müssen ferner nothwendig mit den Axen für Ausdehnung durch Wärme und für Wärmeleitung zusammenfallen. Denn die Einwirkung der Wärme auf einen Körper lässt sich mechanisch zurückführen auf die Ausübung eines nach allen Richtungen gleichen Zuges auf seine Oberfläche im Fall der Erwärmung, eines Druckes im Fall der Erkaltung. Der mechanische Erfolg ist derselbe, wie ja auch die Erfahrung zeigt, dass ein zusammengepresster Körper wärmer, ein der Ausdehnung unterworfenener kälter wird. Die Wärmeleitung aber ist jedenfalls an die Körperatome gebunden, hängt also voraussichtlich nur von der Vertheilung dieser ab. Was dagegen die Strahlung der Wärme betrifft, die hauptsächlich auf Aetherschwingungen beruht, so lässt sich über ihre Axen zunächst nur sagen, dass sie mit den Polarisationsaxen zusammenfallen werden. Wenn man von „thermischen“ Axen spricht, so ist es stets nöthig, sich dieses Unterschieds zwischen Ausdehnung und Zusammenziehung durch Wärme, Wärmeleitung und Wärmestrahlung bewusst zu sein. Endlich aber ist klar, dass die krystallographischen Axen mit den Elasticitäts- und den thermischen Axen für Ausdehnung zusammenfallen müssen. Die Krystallaxen sollen ja unveränderte, feste gegenseitige Lage im Krystall haben, die jeden Augenblick wieder in derselben Weise soll bestimmt werden können. Würden sie aber nicht mit den thermischen Axen für Ausdehnung zusammenfallen, so würden sie mit der Aenderung der Temperatur auch eine andere gegenseitige Lage annehmen, wären sie z. B. vorher bei bestimmter Temperatur rechtwinklig, so würden sie bei jeder andern Temperatur schiefwinklig sein; und würden sie nicht mit den Elasticitätsaxen zusammenfallen, so würde ebenso ein anderer Luftdruck die Lage der Axen zu einander ändern. Wenn auch praktisch diese Aenderungen meistens vernachlässigt werden können (beim Gyps z. B. ist es mit Rücksicht auf Ausdehnung durch Wärme nicht erlaubt), so verlangt doch der Begriff der krystallographischen Axen, dass sie sich nach jenen ändern richten. So oft der Krystallograph im Zweifel ist, welche Richtungen im Krystall als Axen zu nehmen sind, was bei den

zwei letzten Krystallsystemen nicht selten der Fall ist, so muss er sich nach den thermischen und Elasticitätsaxen richten.

Wie weit das Gesagte richtig ist, darüber kann nur die Erfahrung entscheiden und ich werde daher die gemachten Beobachtungen nach den verschiedenen Erscheinungen zusammenstellen.

I. Thermische Axen.

a) Für Ausdehnung.

Mitscherlich beobachtete zuerst die Aenderungen der Flächenwinkel, wenn die Temperatur sich ändert. Da die Messung einer Reihe von Winkeln eines Krystalls über die Lage der einzelnen Flächen zu angenommenen Axen vollständig Aufschluss gibt, so war es möglich auf diese Weise zu bestimmen, ob die angenommenen Axen wirklich bei der Temperaturänderung ihre gegenseitige Lage nicht ändern. Man kann aber noch weiter gehen und mit Neumann aus den beobachteten Winkeln und ihren Aenderungen bei Erwärmung oder Erkaltung durch Rechnung die Axen bestimmen, d. h. diejenigen Richtungen, welche ihre gegenseitige Lage nicht ändern. Neumann hat diese Bestimmung am Gyps ausgeführt, unter der Annahme, dass in der Symmetralebene der Gypskristalle jedenfalls zwei thermische Axen liegen. Als eine derselben bestimmte er die Normale der schiefen Endfläche und es zeigte sich darnach, dass sie sehr nahe mit einer Polarisationsaxe, wie sie Biot bestimmt hatte, zusammenfiel. Angstrom führte die Rechnung noch weiter und bestimmte den Ausdehnungscoefficienten des Gypses (bei einer Temperaturerhöhung von 100 Grad) nach den drei Axen zu:

$$- 0,000508 \quad , \quad 0,003869 \quad \text{und} \quad 0,002384$$

(Das Minuszeichen bedeutet eine Zusammenziehung). Die erste Axe liegt in der Ebene des Blätterbruchs, und bildet mit dem fasrigen Bruch einen Winkel von 14° , mit dem muschligen einen von 55° , die zweite Axe liegt in derselben Ebene senkrecht zur ersten, die dritte steht senkrecht auf dem Blätterbruch.

Pfaff hat eine Reihe von Krystallen, 50 an der Zahl, in Beziehung auf ihre Ausdehnung durch Wärme untersucht, unter

der Voraussetzung, dass die thermischen Axen mit den krystallographischen zusammenfallen. Die Ausdehnung der Krystalle wurde durch Spiegelablesung bestimmt: der sich ausdehnende Krystall drehte einen mit einem Spiegel versehenen Hebel um eine Axe, in dem Spiegel wurde das Bild einer entfernten Skala mit einem festen Fernrohr beobachtet und aus dem Zusammenfallen eines andern Theilstrichs mit dem Faden im Fernrohr auf die Drehung des Spiegels und daraus auf die Ausdehnung des Krystalls geschlossen. Die Resultate, die er erhielt, sind in folgender Tabelle zusammengestellt: (die Ausdehnung ist die lineare von 0 bis 100 Grad):

Reguläre Krystalle:

Granat	. 0,0008478
Flussspath	. 0,0019504
Magneteisen	. 0,0009540
Schwefelkies	. 0,0010084
Bleiglanz	. 0,0018594
Analcim	. 0,0009261

Viergliedrige Krystalle	nach der Hauptaxe	nach den Nebenaxen
Zinnstein	. 0,0004860	. 0,0004526
Vesuvian	. 0,0007872	. 0,0009628
Zirkon	. 0,0006264	. 0,0011054

Dreigliedrige Krystalle	nach der Hauptaxe	nach den Nebenaxen
Beryll	. 0,0001721	. — 0,0000131*)
Korund	. 0,0006875	. 0,0006551
Turmalin	. 0,0009369	. 0,0007732
Quarz	. 0,0008073	. 0,0015147
Kalkspath	. 0,0026261	. — 0,0003105
Spatheisen	. 0,0016133	. 0,0005388
Apatit	. 0,0011254	. 0,0010006

Zwei- und -zweigliederig	Axe a**)	Axe b	Axe c.
Topas	0,0008325	. 0,0008362	. 0,0004723
Arragonit	0,0010781	. 0,0015903	. 0,0031358
Schwerspath	0,0014311	. 0,0022519	. 0,0014904
Cölestin	0,0019205	. 0,0018513	. 0,0014903

*) Das Minuszeichen bedeutet eine Zusammenziehung bei Temperaturerhöhung.

***) Axe c ist die verticale, Axe b die grössere, Axe a die kleinere horizontale Axe nach Haüy's Stellung.

Zwei- und -eingliedrig	Axe a	Axe b	Axe c.
Adular	0,0015678	—0,0000659	0,0002914
Hornblende	0,0008119	0,0000843	0,0009530
Diopsid	0,0008125	0,0016963	—0,0001707
Gyps	0,0015589	0,0036278	0,0022842

Die Ausdehnung der Krystalle durch Wärme ist demnach eine sehr beträchtliche. Während dasjenige der gebräuchlichen Metalle, welches sich am stärksten ausdehnt, Zink, um 0,00294 seiner Länge bei einer Temperaturzunahme von 100 Grad zunimmt, nehmen Gyps und Arragonit noch stärker zu wenigstens nach bestimmten Richtungen, und Schwerspath und Kalkspath nahezu ebenso stark. Bei genaueren Bestimmungen des specifischen Gewichts ist das nicht ausser Acht zu lassen. Auffallend ist die Zusammenziehung nach bestimmten Richtungen bei Temperaturerhöhung, so beim Kalkspath, beim Adular und Beryll, aber überall so wenig, dass gleichwohl mit der Temperaturerhöhung eine Volumsvermehrung verbunden ist. Es liegt also nur eine theilweise Analogie vor zu der Erscheinung, welche das Wasser bei der Erwärmung von 0 auf 4 Grad zeigt. Die oben angeführte Bestimmung von Neumann und Angstrom stimmen bei Axe b und Axe c gut überein, bei Axe a ist der Unterschied beträchtlich. Pfaff schreibt dies dem Umstand zu, dass bei der Ausdehnung die Flächen des Gypses sich leicht krümmen, so dass die Winkelmessungen mit dem Reflexionsgoniometer unsicher werden. Das allgemeine Resultat der beobachteten Zahlen ist jedenfalls, dass die Ausdehnung nach verschiedenen Richtungen verschieden ist, aber nicht nachgewiesen ist durch diese Beobachtungen, dass die Axen für Ausdehnung mit den krystallographischen Axen zusammenfallen.

b) Für Wärmeleitung.

Sénarmont benützt ein äusserst einfaches Verfahren, um die Wärmeleitung nach beliebigen Richtungen in einer Krystallplatte zu bestimmen. Die Platte wird ungefähr in der Mitte mit einer engen Durchbohrung versehen und in die kleine Oeffnung ein

konisch zugespitzter die Wärme gut leitender Metalldraht eingegeben. Wird dann die Platte mit einer dünnen Schicht Wachs überzogen und der Draht erwärmt (die Platte vor der direkten Einwirkung der Wärmequelle durch einen Schirm geschützt) so wird durch die vom Draht aus der Platte mitgetheilte Wärme das Wachs geschmolzen. Die Gränze des geschmolzenen Waxes gibt eine isotherme Kurve, d. h. eine Linie, auf welcher überall die Temperatur dieselbe ist. Hört man mit der Erwärmung des Drahtes auf, so wird das Wachs wieder fest, aber die Gränze zwischen dem vorher geschmolzenen und dem nicht geschmolzenen zeichnet sich in den meisten Fällen noch deutlich ab. Der Vortheil dieser Methode ist, dass die Fortpflanzung der Wärme nach verschiedenen Richtungen unmittelbar graphisch dargestellt wird, ein Nachtheil ist, dass sehr genaue Messungen nicht möglich sind, und namentlich verschiedene Krystalle kaum unter sich zu vergleichen sind. Es dient also diese Methode vorzüglich zur Bestimmung der Lage der Axen für Wärmeleitung.

Das Resultat von Sénarmont's Beobachtungen ist bei den einfachen Krystallsystemen das zu erwartende, dass die Axen für Wärmeleitung mit den krystallographischen Axen zusammenfallen. Scheiben von Glas oder Metall geben kreisrunde isotherme Kurven, ebenso Scheiben von Quarz und Kalkspath, die senkrecht zur Hauptaxe geschnitten waren. Krystalle des regulären Systems — Flussspath, Schwefelkies, Magneteisen, Röthkupfererz, Bleiglanz, Blende — ergeben für Scheiben, die nach den verschiedensten Richtungen geschnitten sind, Kreise als isotherme Kurven, sie leiten also nach allen Seiten hin die Wärme gleich gut. Bei einer Reihe von Krystallen des viergliedrigen Systems — Zinnstein, Rutil, Idokras, Quecksilberchlorür — zeigten die zur Hauptaxe senkrechten Scheiben durchweg Kreise, dagegen Scheiben parallel zur Axe Ellipsen, deren eine Axe der Krystallaxe parallel, die andere dazu senkrecht war. Das Grössenverhältniss dieser Axen war, soweit es gut sich messen liess:

bei Rutil	121 : 100
bei Idokras	100 : 106
bei Quecksilberchlorür	133 : 100

Bei einer Reihe dreigliedriger Krystalle — Kalkspath, Quarz, Beryll, Eisenglanz, Korund — ergeben sich ebenso durchweg auf Scheiben, die senkrecht zur Krystallaxe waren, Kreise als isotherme Kurven, bei Scheiben, die parallel zu derselben Axe waren, Ellipsen. Die messbaren Axenverhältnisse dieser Ellipsen (die erste Zahl bezieht sich wie vorher auf die der Krystallaxe parallele Ellipsenaxe) sind:

bei Quarz 131 : 100

bei Kalkspath 112 : 100

bei Beryll 111 : 100

Eisenglanz und Korund zeigten parallel zur Krystallaxe eine merkbar kleinere Ellipsenaxe, doch so wenig unterschieden von der andern, dass eine Zahlenangabe unsicher war.

Bei diesen beiden Systemen, dem viergliedrigen und dreigliedrigen, sind also die isothermen Flächen, wie zu erwarten war, Umdrehungsellipsoide, deren Hauptaxe mit der Krystallhauptaxe zusammenfällt.

Im zwei- und -zweigliedrigen System wurden Schwerspath, Topas, Arragonit und Schwefelantimon untersucht. Schwerspath zeigte wenig Abweichung von Kreisen, Topas etwas mehr, so dass man sah, dass die kleinste Axe des Ellipsoids, welches hier die isotherme Fläche vorstellt, der vertikalen Kante des Prisma parallel, die grösste parallel der kleinen, die mittlere parallel der grossen Diagonale der Basis ist. Arragonit dagegen hat die grösste Axe parallel den vertikalen Prismenkanten, in der Basis zeigt es das Axenverhältniss 100 : 122, die kleinere Axe der grössern Diagonale der Basis parallel. Schwefelantimon verhält sich in gleichem Sinn wie Arragonit, die Ellipticität ist aber viel beträchtlicher. Die Axenverhältnisse sind: 100 : 128 : 181. Die isothermen Flächen sind also wie wieder zu erwarten war, dreiaxige Ellipsoide, deren Axen den Krystallaxen parallel sind.

Beim zwei- und -eingliedrigen System fällt immer eine Axe des Ellipsoids mit der Senkrechten zur Symmetralebene zusammen. In der Symmetralebene dagegen zeigen sich verschiedene Verhältnisse. Beim Feldspath fallen die Axen mit den Polarisationsaxen und den Axen für Ausdehnung zusammen, beim Augit

nur nahezu; beim Gyps aber bildet die grössere Axe der Ellipse einen Winkel von etwa 50° gegen den fasrigen Bruch, 31° gegen eine der Polarisationsaxen (die optische Mittellinie), fällt also nach dem Obigen (unter a) nicht mit den Axen für Ausdehnung zusammen. Es wurde dieses Resultat von Angstrom bestätigt, das Axenverhältniss ist 100 : 123.

Eine andere Methode wandte Pfaff an: er schief die Krystalle senkrecht zu den drei Krystallaxen zu Würfeln, brachte sie über eine Oeffnung in einem Gefäss, in welchem Wasser siedend erhalten wurde, und beobachtete die Temperaturerhöhung, welche einer abgewogenen über dem Würfel befindlichen Wassermasse in einer bestimmten Zeit durch den Würfel hindurch mitgetheilt wurde. Diese Methode bestimmt also nicht die Lage der Axen für Wärmeleitung, aber sie gibt genauere Werthe als die Methode Sénarmont's und gibt ein Mittel, verschiedene Krystalle unter sich zu vergleichen. Beide Methoden mit einander verbunden werden alles Gewünschte liefern.

Die Resultate Pfaff's sind in folgender Tafel zusammengestellt: (die Wärmeleitung des Silbers ist mit 1000 bezeichnet, die des Kupfers mit 870).

reguläre			
Bleiglanz	246		
Schwefelkies	599		
Flusspath	443		
dreigliedrig	Hauptaxe	Nebenaxen	
Kalkspath	374	327	
Quarz	503	391	
Turmalin	335	307	
zwei-und-zweigliedrig	Axe a	Axe b	Axe c
Schwerspath	248	245	228
Adular	241	260	298

Die Resultate stimmen gut mit den von Sénarmont erhaltenen, denn das Axenverhältniss ist bei

	nach Pfaff	nach Sénarmont
Quarz	100 : 129	100 : 131
Kalkspath	100 : 119	100 : 112
Schwerspath	100 : 101 : 107	ungefähr gleich

c) Für Wärmestrahlung.

Knoblauch hat eine Reihe von Krystallen untersucht nach Melloni's Methode. Sonnenstrahlen fielen auf den Krystall, gingen durch denselben und erwärmten hinter ihm eine thermoelektrische Säule; der galvanische Strom, der dadurch entstand, wurde an einem empfindlichen Galvanometer gemessen: der Ausschlag gab ein Mass für die durch den Krystall gegangene Wärme. Ausserdem wurden die Wärmestrahlen noch qualitativ untersucht, d. h. bestimmt, wie viel von der durchgegangenen Wärme nachher noch durch verschieden gefärbte Gläser ging. Wie das Sonnenlicht eine Reihe von verschiedenen, verschiedenfarbigen Lichtstrahlen enthält, so zeigen auch die mit den Lichtstrahlen immer verbundenen Wärmestrahlen Verschiedenheiten, die der Farbe analog sind. Durch ein rothes Glas z. B. geht nur rothes Licht, alles andere im Sonnenlicht enthaltene farbige Licht, gelb, grün, blau etc. wird absorbirt, geht verloren; ebenso geht durch dieses rothe Glas nur ein bestimmter Theil der von der Sonne kommenden Wärmestrahlen, ein anderer durch ein gelbes Glas u. s. w. Wie ein Krystall beim Durchsehen nach verschiedenen Richtungen verschiedene Farben gibt, z. B. der Dichroit, der eben daher seinen Namen hat, so ist zu vermuthen dass ein Krystall im Allgemeinen nach verschiedenen Richtungen mehr Wärme der einen, als der andern Art absorbiren wird, so dass die nachher noch durch verschieden gefärbte Gläser durchgehende Wärmemenge bei verschiedenen durchstrahlten Richtungen des Krystalls verschieden ausfällt.

Die Methode bestimmt, ähnlich wie die Pfaffs nicht die Axen für Wärmestrahlung, sondern konstatirt nur die Verhältnisse in der Richtung der Krystallaxen. Knoblauch gibt die Verhältnisse nach den Polarisationsaxen an: diese sind, wie später näher gezeigt werden wird, die Halbirungslinie des spitzigen Winkels der optischen Axen oder die Mittellinie, die Halbirungslinie des stumpfen Winkels der optischen Axen oder die Supplementarlinie, und die auf diesen beiden senkrecht stehende Perpendicularlinie. Es sind diese Axen gewählt, da die Wärme-

strahlung offenbar in der innigsten Beziehung zur Lichtbewegung steht, weil beide auf den Aetherschwingungen beruhen.

Zwei reguläre Krystalle, Flussspath und Steinsalz, zeigten in zwei zu einander senkrechten Richtungen deutlich Unterschiede in der Menge der durchgehenden Wärme, namentlich Steinsalz. Auch in qualitativer Hinsicht zeigte sich bei Steinsalz einiger Unterschied, bei Flussspath keiner. Knoblauch schreibt diese anomalen Erscheinungen der ungleichmässigen innern Structur der angewandten Krystalle zu und macht dies sehr anschaulich durch Untersuchung des Achats, der parallel zu den einzelnen Schichten und senkrecht dazu Wärmemengen durchlässt, die sich wie 100 : 6 verhalten. (Man kann vielleicht hinzusetzen, dass etwas Aehnliches immer bei Krystallen mit ausgezeichneten Blätterdurchgängen vorkommen wird, weil nicht selten längs dieser Durchgänge eine wirkliche Trennung innerhalb des Krystalls stattfindet, die zu Reflexionen Anlass gibt und zwar nach der einen Richtung mehr als nach der andern).

Drei Krystalle des dreigliedrigen Systems, Bergkrystall, Beryll und Turmalin, zeigten in zwei zur Hauptkrystallaxe senkrechten und unter sich rechtwinkligen Richtungen keinen Unterschied. Die Wärmemengen, welche parallel und senkrecht zu jener Axe durchgingen, verhielten sich bei Bergkrystall wie 100 : 92, bei Beryll wie 100 : 54, und zeigten nur kleine qualitative Verschiedenheiten, bei Turmalin wie 100 : 158 und zeigten qualitativ beträchtliche Verschiedenheiten.

Bei Idokras verhielten sich die parallel und senkrecht zur Hauptaxe durchgegangenen Wärmemengen, wie 100 : 78 und waren qualitativ verschieden, in zwei zur Hauptaxe senkrechten Richtungen wie 100 : 102 und waren qualitativ gleich.

Von zweigliedrigen Krystallen wurden Dichroit und Topas untersucht. Das Verhältniss der Wärmemengen, die nach der Mittellinie, der Supplementarlinie und der Perpendikularlinie durchgingen, war beim ersten 100 : 36 : 46, beim zweiten 100 : 132 : 104, und beidemale zeigte sich qualitative Verschiedenheit der durchgestrahlten Wärme nach den drei verschiedenen Richtungen.

Die Verhältnisse sind also hier bei den nicht regulären Krystallen durchaus die zum Voraus zu erwartenden. Die Menge der durch Strahlung sich verbreitenden Wärme ist durch ein Ellipsoid bestimmt, dessen Axen mit den Krystallaxen zusammenfallen. Die Grösse der Axen ändert sich aber für die verschiedenen Arten von Wärme, wie sie den verschieden gefärbten Lichtstrahlen entsprechen, ein Verhältniss, das wir später in derselben Weise beim Licht finden werden.

II. Akustische Axen.

Statt Elasticitätsaxen gebrauche ich, da die Bedeutung derselben eine vielfache ist, den Namen akustische Axen, weil die Verhältnisse der Elasticitätskräfte zwischen den Körperatomen durch akustische Versuche gefunden werden, durch die Höhe des Tons, den eine Krystallplatte gibt, und durch die Klangfiguren, die auf der Platte sich bilden, wenn sie mit feinem Sand bestreut wird. Die beste Einsicht in das Verfahren gibt die Arbeit von Savart über die Elasticität der Krystalle, von der ich hier einen Auszug gebe.

Wenn man aus Glas oder Metall oder irgend einem nicht krystallinischen Mittel eine kreisförmige, überall gleich dicke Scheibe bildet und dieselbe zum Tönen bringt, so ordnet sich feiner aufgestreuter Sand entweder nach concentrischen Ringen oder nach Durchmessern, welche die Scheibe in gleiche Sektoren theilen. Das erste geschieht hauptsächlich, wenn man die passend befestigte Platte im Mittelpunkt, das letztere wenn man sie am Umfang mit einem Bogen streicht. Beide Arten von Linien heissen Knotenlinien, sie sind bei der Schwingung in Ruhe und deswegen sammelt sich auf ihnen der Sand. Die Lage der Durchmesser hängt bloss ab von der Stelle, wo die Erschütterung stattgefunden hat: wird diese Stelle gewechselt, so ändert sich auch die Lage der Durchmesser so, dass die Erschütterungsstelle immer in der Mitte zwischen zwei Durchmessern liegt. Nimmt man dagegen eine Scheibe aus einer Masse, die nach verschiedenen Richtungen sich verschieden verhält, so ist das nicht mehr

der Fall. Schneidet man beispielsweise eine Scheibe aus Holz parallel mit dem Stamm, so ist die Elasticität in der Richtung der Fasern eine andere als senkrechte dazu: eine Biegung, bei welcher die Fasern gerade bleiben, ist leichter auszuführen, als eine, wobei die Fasern gebogen werden, d. h. die Biegeelasticität parallel den Fasern ist grösser, als senkrecht zu denselben. Jetzt ist es nicht mehr möglich bei Befestigung in der Mitte und Erschütterung am Umfang die Durchmesser als Knotenlinien an beliebiger Stelle hervorzubringen; so wie sie sich zeigen, so fallen sie mit der Richtung der grössten und kleinsten Elasticität oder was dasselbe ist, mit der Richtung der Fasern und der dazu senkrechten Richtung zusammen. Doch kann man noch eine zweite Schwingungsart hervorrufen. Wenn man ein Ende jener Durchmesser als Erschütterungspunkt wählt, so bilden sich zwei wenig gekrümmte hyperbolische Aeste, symmetrisch gelegen zu den den Fasern parallelen Durchmesser und den darauf senkrechten Durchmesser durchschneidend. Man ist darnach berechtigt, daraus, dass auf einer kreisförmigen Scheibe von gleicher Dicke Durchmesser als Knotenlinien nur in bestimmter Lage und bei Erschütterung eines Endes der Durchmesser hyperbolische Knotenlinien entstehen, zu schliessen, dass die Scheibe eine Axe der grössten Elasticität in der Richtung des Durchmessers hat, der von den Hyperbeln nicht geschnitten wird, und senkrecht dazu eine Axe der kleinsten Elasticität.

Scheiben, die senkrecht zur Axe des Stamms aus demselben geschnitten sind, werden sich wie unkrystallisierte Körper verhalten, Scheiben, die parallel zur Axe geschnitten sind, wie wir sie eben vorausgesetzt haben, können noch verschiedene Lage haben: sie können die Jahresringe berühren oder senkrecht auf ihnen stehen. Schneidet man aus einem grössern Stamm möglichst entfernt von der Axe desselben ein Stäbchen, möglichst dünn, parallel zum Stamm, ein zweites, das verlängert durch die Axe des Stamms geht und auf ihm senkrecht steht, und ein drittes, welches auf beiden ersten senkrecht steht, also an die Jahresringe in einem zur Axe senkrechten Schnitt Tangente ist, so lässt sich das erste am wenigsten leicht biegen, das zweite leichter, das

dritte am leichtesten. Man hat also in jedem von der Axe des Stamms weiter entfernten Punkte drei verschiedene Elasticitätsaxen, und daher als Symbol der Vertheilung der Elasticität um den Punkt ein dreiaxiges Ellipsoid. In allen Scheiben, die durch eine dieser Axen gehen, bemerkte Savart zwei Durchmesser als Knotenlinien an festen Stellen, einer immer entsprechend der Elasticitätsaxe, und die zwei hyperbolischen Aeste. Bei den Scheiben, die durch die Axe der mittleren Elasticität gehen, wechseln diese hyperbolischen Aeste ihre Lage, wenn man von der Lage der Scheiben, wo sie noch die grösste Elasticitätsaxe enthält, allmählig übergeht zu derjenigen, wo sie noch die kleinste enthält und es entspricht diess ganz der oben gegebenen Regel für die Lage der Hyperbeln, welche immer die kleinere Elasticitätsaxe in der Scheibe schneiden. Verschafft man sich nun ferner Scheiben, welche keine der Elasticitätsaxen in sich enthalten, so erhält man als Knotenfiguren beidemale hyperbolische Kurven und nie gerade Linien. Man sieht, dass durch diese Untersuchungen ein Anhaltspunkt gegeben ist, um sich durch Versuche von der Lage der Elasticitätsaxen in einem beliebigen Krystall Kenntnisse zu verschaffen.

Savart untersuchte darnach den Bergkrystall und kam zu folgenden Resultaten: Alle zu den Säulenflächen parallel geschnittene Scheiben geben die gleichen Klangfiguren, zwei zu einander senkrechte Grade, von denen die eine der Krystallaxe parallel ist und zwei hyperbolische Aeste, sie geben auch alle denselben Ton. Dagegen geben Scheiben, die senkrecht auf zwei gegenüberliegenden Säulenflächen stehen und auch der Axe parallel sind, zwei hyperbolische Systeme und kein rechtwinkliges Kreuz. Die Linie, welche zu den zwei Hyperbelsystemen symmetrisch liegt, ist parallel einer der Spaltungsflächen des Bergkrystalls. Eine zur Axe senkrechte Scheibe gibt zwei rechtwinklige Kreuze, welche die ganze Scheibe in acht Sektoren theilen, obgleich zu erwarten wäre, dass man jeden beliebigen Durchmesser als Knotenlinie erhalten könne, weil die Elasticität nach allen Seiten gleich sein sollte. Scheiben, die zwei aneinander stossenden Pyramidenflächen parallel gehen, zeigen verschiedene Klangfigu-

ren und geben verschiedene Töne, während Scheiben, die nicht zusammenstossenden und nicht gegenüberliegenden Pyramidenflächen parallel sind, sich ganz identisch verhalten. Es zeigt sich also hiebei wieder der Einfluss der Spaltbarkeit. Eine Reihe von Scheiben, welche durch eine der Grundkanten der Säule gehen, zeigt durchaus dieselben Umgestaltungen der Knotenlinien wie eine Reihe von Scheiben eines Körpers mit drei ungleichen Elasticitätsaxen, welche durch die mittlere dieser Axen gehen. Alle diese Thatsachen passen nicht in die sonstigen einfachen Verhältnisse, sie scheinen nicht von drei rechtwinkligen Axen bedingt zu sein, sondern wesentlich von der Spaltbarkeit, so dass Savart seine Zuflucht zu drei Systemen von je drei Elasticitätsaxen nimmt. Eine stumpfe Kante des Rhomboeders, das man durch Erhitzen und rasches Abkühlen eines Bergkrystalls erhalten kann, wäre dann nach ihm die Richtung der kleinsten Elasticität, die grosse Diagonale der dieser Kante gegenüberliegenden Rhomboederfläche die der mittlern und die kleine Diagonale derselben die der grössten Elasticität. Aehnliche Verhältnisse zeige auch der Kalkspath. Wie diese drei Systeme unabhängig von einander existiren sollen, ist nicht recht klar, es scheinen hier noch unaufgeklärte Dinge zu Grunde zu liegen, so dass vorerst weitere Versuche, namentlich mit andern Krystallen, abzuwarten sind.

Angstrom untersuchte den Gyps, indem er Scheiben parallel dem Blätterdurchgang gespalten zum Tönen brachte. Wurden sie am Rande gestrichen, so erhielt er Hyperbelsysteme, die aber nicht constant an derselben Stelle blieben, wurden sie in der Mitte erschüttelt, so erhielt er elliptische Kurven, den Kreisen der unkrytallisirten Scheiben entsprechend. Aber auch diese behalten ihre Lage nicht fest, so dass Angstrom schliesst, die klinoedriscen Krystalle besitzen in akustischer Hinsicht überhaupt keine rechtwinklichen Axen und diese zeigen etwas Aehnliches, wie die Dispersion der optischen Axen.

Man sieht, die akustischen Experimente geben vorerst ein unerfreuliches Resultat, wenn man alle Eigenschaften der Krystalle aus der zu drei Ebenen symmetrischen Anordnung der

Moleküle erklären will. Uebrigens ist es auch der Theorie bisher nicht gelungen, den Schwingungszustand einer kreisförmigen Platte zu bestimmen, welche nach verschiedenen Richtungen verschieden elastisch ist und es wäre wohl möglich, dass die obigen Beobachtungen nicht jener Vertheilung der Moleküle widersprechen, sondern der Vergleichung mit den Holzscheiben, von denen Savart ausgeht.

III. Elektrische Axen.

Wiedemann hat die elektrische Leitungsfähigkeit der Krystalle in analoger Weise, wie Sénarmont die Wärmeleitungsfähigkeit bestimmt. Bestreut man eine Glas- oder Harzfläche mit einem feinen, schlechtleitenden Pulver, wie semen lycopodii, Mennige u. s. w. und theilt einer senkrecht zur Fläche mit der Spitze gegen die Fläche isolirt befestigten Nadel durch Annäherung des Knopfs einer geladenenen Leydner Flasche Elektrizität mit, so entfernt sich das Pulver von der Spitze aus nach allen Richtungen hin gleichförmig und entblöst eine in ihrer Umgränzung sehr nahe kreisförmige Figur. Wendet man statt des Glases oder Harzes die Fläche eines Krystalls an, so sieht man deutlich, wie sich im Allgemeinen das Pulver nicht mehr nach allen Seiten hin gleichförmig ablöst, sondern nach zwei entgegengesetzten Richtungen am meisten und senkrecht dazu am wenigsten von der Spitze entfernt. Die blosgelegte Fläche ist nahezu elliptisch mit sehr verschiedenen Axen.

Die regulären Krystalle, Alaun und Flussspath, zeigten stets Kreise.

Turmalin, Apatit, Kalkspath, essigsäures Kalkkupferoxyd zeigten auf den zur krystallographischen Axe parallelen Seitenflächen eine in der Richtung jener Axe verlängerte Ellipse, Quarz dagegen eine in dieser Richtung verkürzte.

Cölestin zeigte auf einer nach dem Hauptblätterdurchgang gespaltenen Platte eine Ellipse, deren längere Axe mit der kleineren Diagonale des von den beiden andern Blätterbrüchen gebildeten Parallelogramms zusammenfiel. Schwerspath verhielt sich ebenso.

Arragonit, Borax, Epidot, Feldspath zeigten ebenso durchweg Ellipsen, deren Axen parallel mit den krystallographischen liegen, beim ersten lag die grosse Axe der Elipse parallel der Axe der Säule, bei den drei letzten senkrecht dazu.

Es bestätigte sich durchweg, dass der schnellsten Fortpflanzung des Lichts die leichteste Leitung der Elektrizität entsprach.

IV. Magnetische Axen.

Jeder Körper in Stabform nimmt gegen zwei entgegengesetzte Magnetpole eine bestimmte Stellung ein, entweder stellt sich seine Längenrichtung von Pol zu Pol, d. h. „axial“, oder senkrecht zu dieser Linie, d. h. „äquatorial“. Nur ist es nöthig, bei den meisten Substanzen sehr kräftige Magnete, wie wir sie durch den galvanischen Strom erhalten, zu benützen. Körper, die sich axial stellen, wie Eisen, heissen magnetisch, solche, die sich äquatorial stellen, heissen diamagnetisch. Es fragt sich, ob in Beziehung auf diese Eigenschaften ebenfalls Unterschiede nach verschiedenen Richtungen in den Krystallen sich zeigen.

Knoblauch und Tyndall haben diese Frage beantwortet. Es wurden aus Turmalin und Beryll Würfel geformt und diese zwischen die Pole eines sehr kräftigen Magnets gebracht. Würfel aus unkrystallisirten Stoffen nehmen für sich keine bestimmte Stellung zu den Polen ein, weil keine Richtung in ihnen vorherrscht; ein Eisenwürfel z. B. kann jede beliebige Lage haben. Dagegen zeigte der Turmalinwürfel, wenn seine Hauptaxe in der Horizontalebene durch beide Pole drehbar war, entschieden das Bestreben sich so zu stellen, dass diese Axe äquatoriale Lage hatte. Der Beryllwürfel drehbar um seine Hauptaxe stellt sich immer so, dass eine bestimmte Diagonale des Querschnitts axial war, eine Erscheinung, die mit der Gleichheit nach allen Richtungen senkrecht zur Hauptaxe in Widerspruch steht. Ebenso zeigten runde Platten aus Kalkspath senkrecht zur Axe geschnitten nicht eine beliebige, sondern immer eine bestimmte Stellung. Um diese Erscheinungen näher zu untersuchen, wurden nun elf Platten aus Kalkspath parallel zur Axe geschnitten und kreis-

förmig begrenzt. Die Scheiben konnten sich um eine zu ihnen senkrechte Axe drehen. Bei fünf nahm die Krystallaxe eine äquatoriale, bei sechs eine axiale Stellung an. Wurden aus denselben elf Kalkspathen Platten gespalten parallel einem der Blätterdurchgänge, so stellte sich die kreisförmige Scheibe so, dass die Halbirungslinie des spitzen Winkels der zwei andern Spaltungsrichtungen in der Scheibe eine axiale Stellung annahm bei den fünf, eine äquatoriale bei den sechs. Liess man den Platten die natürliche Rhombenform, ohne sie kreisförmig zu begrenzen, so stellte sich bei den fünf die lange Diagonale axial, bei den sechs äquatorial, was dem vorhergehenden Fall vollkommen entspricht. Es ging daraus hervor, dass ein Unterschied zwischen den fünf und sechs sein müsse, der von der Krystallform unabhängig war. Es wurden daher Stücke der elf Kalkspathe gepulvert und zu kleinen Cylindern geformt. Die fünf stellten sich äquatorial, die sechs axial, die fünf waren also diamagnetisch, die sechs waren magnetisch. Ein weiterer Versuch zeigte wirklich, dass kleine Stückchen der fünf von einem kräftigen Magnetpol abgestossen, kleine Stückchen der sechs angezogen wurden, und eine chemische Analyse endlich liess keinen Zweifel über den Unterschied: die sechs magnetischen enthielten etwas kohlensaures Eisenoxydul, die fünf keines. Die wesentliche Substanz des Kalkspaths ist diamagnetisch, eine kleine Beimengung von Eisen oder Eisensalzen kann aber den Diamagnetismus in Magnetismus umkehren, weil die magnetischen Kräfte des Eisens bei weitem die magnetischen und diamagnetischen Kräfte aller andern Körper überwiegen.

Die gemachten Versuche scheinen darauf hinzudeuten, dass Alles sich erklären lasse, wenn man annimmt, dass nach bestimmten Richtungen die diamagnetische oder magnetische Wirkung stärker oder schwächer ist und das Verhalten des Kalkspaths liess schliessen, dass die Wirkung in derjenigen Richtung am stärksten ist, wo die Theile am nächsten bei einander sind. Um darüber sicher zu sein, wurde aus gepulvertem kohlensaurem Kalk durch Beimengung von Gummilösung eine Masse zubereitet, die im Schraubstock nach einer Richtung zusammengesprengt wurde.

Dann wurde aus dieser Masse ein Rhomboeder geformt, dessen Axe mit der Richtung der Zusammenpressung zusammenfiel; dieses Rhomboeder zeigte zwischen den Magnetpolen ganz dasselbe Verhalten, wie ein Kalkspathrhomboeder. Durch diesen Versuch ist klar nachgewiesen, dass die Verschiedenheit des diamagnetischen Verhaltens in einem Krystall bloss abhängt von der Lagerung der Moleküle zu einer symmetrischen Axe. Dasselbe wurde noch durch einen zweiten Versuch nachgewiesen. Eine Masse aus Eisenoxyd geformt, einseitig gepresst, so dass in einem daraus gebildeten Rhomboeder diese Richtung mit der Axe des Rhomboeders zusammenfällt, zeigte ganz dasselbe Verhalten, wie Eisenglanz. Beim Schwerspath ist nach dieser Erklärung in Folge seines diamagnetischen Verhaltens die diamagnetische Wirkung parallel der kurzen Diagonale der Basis des Prisma grösser als längs der Axe des Prisma und längs dieser Axe grösser als parallel der grossen Diagonale der Basis. Wenn hier noch derselbe Satz gilt, wie bei dem Kalkspath und Eisenglanz, so müssten in der Richtung der kurzen Diagonale die diamagnetischen Theile am nächsten an einander liegen, in der Richtung der langen Diagonale am wenigsten nahe. Um die Richtigkeit dieser Ansicht zu prüfen, wurde Wismuth, das diamagnetisch ist, wie Schwerspath, zu Pulver gestossen, mit Gummilösung zu einer zusammenhängenden Masse geformt und diese nach einer Richtung einem starken Druck ausgesetzt, nach einer zweiten dazu senkrechten einem schwächern, nach der auf diesen beiden senkrechten Richtung gar nicht gepresst. Diesen drei Richtungen entsprechend wurde nun ein Modell der Grundform des Schwerspaths geformt und dieses verhielt sich in magnetischer Beziehung in der That ganz wie Schwerspath.

Weitere Versuche zur Bestätigung dieser Ansicht sind, dass bei einem Würfel des diamagnetischen Topases der Hauptblätterbruch sich äquatorial, bei einem des magnetischen Beryll axial stellt. Die diamagnetischen Krystalle von schwefelsaurem Zinkoxyd und schwefelsaurer Magnesia stellen sich mit dem Hauptblätterbruch, der hier der Hauptaxe parallel ist, äquatorial, das gleich krystallisirte schwefelsaure Nickeloxyd mit gleichem Blätter-

bruch dagegen axial, weil es magnetisch ist. Derselbe Unterschied zeigt sich bei dem diamagnetischen Kalkspath und dem magnetischen Eisenglanz.

Die Verfasser schliessen daher ihre Abhandlung mit dem Satz: dass alle bis jetzt bekannten Erscheinungen, welche die Krystalle in ihrem Verhalten zwischen den Magnetpolen von den unkrystallinischen Körpern unterscheiden, sich auf die Annahme einer nach verschiedenen Richtungen ungleichen Aggregation ihrer materiellen Theilchen zurückführen lassen.

V. Optisches Verhalten der Krystalle.

Das optische Verhalten der Krystalle ist bis jetzt am weitesten erforscht und in Einklang gebracht mit der allgemeinen Theorie der Elasticität. Nur bei den letzten zwei Krystallsystemen kommen Erscheinungen vor, die eine genügende Erklärung nicht gefunden haben. Die Erscheinungen im Allgemeinen sind hier complicirter, weil es sich nicht bloss um die Geschwindigkeit des Lichts, sondern auch um die Schwingungsrichtung handelt, beide nach verschiedenen Richtungen verschieden sind und die Verschiedenheit der optischen Erscheinungen von beiden zugleich abhängt.

Ich werde hier mit der Darstellung der Theorie beginnen, da sie überall den einfachsten Weg zum Ziel führt und in der Erfahrung durchweg sich bewahrheitet hat und erst nach der theoretischen Ausführung die hauptsächlichsten bestätigenden Beispiele anführen.

Das Licht wird hervorgebracht durch Schwingungen der Aethertheilchen, die senkrecht zur Richtung des Lichtstrahls stattfinden, also Querschwingungen sind. Erschüttern wir eine Stelle einer Wasseroberfläche durch einen hineingeworfenen Stein, so entstehen Wellen, die sich nach allen Seiten hin fortpflanzen: denken wir uns die Wasseroberfläche mit ihren Wellen durch eine vertikale Ebene geschnitten, welche durch den Erschütterungspunkt geht, so haben wir in dieser Ebene ein Bild der Lichtschwingungen und von diesem Bild sind auch die technischen Bezeichnungen zur Charakterisirung der Lichtschwingun-

gen genommen. Man hat eine Reihe von Wellenbergen und Wellenthälern, je zwei aneinander stossende geben eine vollständige Welle und der Raum, den sie in der Richtung der Fortpflanzung der Wellen einnimmt, heisst eine Wellenlänge. Bei der Fortpflanzung der Wellen bewegen sich die Wassertheilchen und ebenso die Aethertheilchen nicht in der Richtung der Fortpflanzung (das Wasser entfernt sich nicht vom Erschütterungspunkt), sondern nur senkrecht zur Fortpflanzung, also beim Wasser vertikal auf- und abwärts, wie irgend ein auf einer mit Wellen bedeckten Wasseroberfläche schwimmender Körper zeigt. Ein sehr einfacher Apparat, um die einfachste Wellenbewegung zu studiren, ist folgender: Auf der Decke eines Zimmers wird eine gerade Linie gezogen und in gleiche Theile getheilt, etwa von zwei zu zwei Fuss, von jedem der Theilpunkte geht ein dünner Draht abwärts, der ein Bleigewicht von etwa $\frac{1}{2}$ Pfund trägt; alle Drähte sind gleich lang, alle Gewichte gleich gross. Die einzelnen aufgehängten Gewichte werden nun durch elastische Federn verbunden, entweder Gummifäden oder besser dünne Messingschraubenfedern, wie sie zu Bandagen, Hosenträgern u. s. w. verwendet werden; alle diese Federn müssen gleich lang und so lang sie nicht gezogen werden, kürzer als zwei Fuss, etwa anderthalb Fuss sein. Die übrig bleibenden Enden der äussersten Federn werden an der Wand befestigt. Nun hat man eine Reihe von Molekülen, durch die Gewichte vorgestellt und durch Kräfte an einander gefesselt, die mit der Entfernung zu- und abnehmen. Je länger die Reihe, desto besser gelingt folgender Versuch.

Ist alles nach der Anordnung zur Ruhe gekommen, so bewege man durch einen schwachen Stoss eines der Gewichte horizontal seitwärts, senkrecht zur ganzen Reihe. Dann erreicht das Gewicht eine äusserste seitliche Lage, kehrt wieder zurück, geht über die Ruhelage hinaus, erreicht auf der andern Seite eine äusserte Lage, kehrt zur Ruhelage zurück und bleibt in dieser. Seine Bewegung ist vorerst beendet, aber damit hört die Bewegung überhaupt noch nicht auf. Bald nachdem das gestossene Gewicht sich in Bewegung gesetzt hat, fängt auch das

folgende eine Bewegung an, die genau den Verlauf hat, wie die des ersten: grösste Ausweichung nach einer Seite, Rückkehr durch die Ruhelage, grösste Ausweichung nach der andern Seite, Rückkehr in die Ruhelage, Ruhe sind die Momente seiner Bewegung. Etwas später als dieses zweite Gewicht beginnt das dritte wieder eine solche Bewegung und so fort längs der ganzen Reihe. Dass jedes folgende Gewicht mit in die Bewegung gerissen wird, ergibt sich ganz einfach daraus, dass bei der Bewegung des ersten die Feder zwischen beiden stärker angespannt und etwas aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht wird. Also wirken jetzt auf das zweite Gewicht nicht mehr gleiche Kräfte von beiden Seiten, die Gleichgewichtslage kann nicht mehr bestehen. Die Zeiten, in welchen die einzelnen Gewichte ihre Bewegungen ausführen, sind bei allen gleich, oder die Schwingungsdauer ist durchweg dieselbe. Bis das erste Gewicht seine Schwingung ausgeführt hat, hat sich die Bewegung längs der Reihe fortgepflanzt bis zu irgend einem andern Gewicht, das jetzt seine Schwingung beginnt; die Entfernung dieses Gewichts vom ersten ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schwingung in dieser Zeit längs der Reihe. Sie ist verschieden nach der Grösse der Gewichte und der Spannung der Federn, lässt sich aber mit dem beschriebenen Apparat leicht mit den Augen verfolgen. Zugleich ist jene Entfernung eine Wellenlänge, denn da das erste Gewicht seine ganze Schwingung vollendet hat, das letzte erst zu schwingen beginnt, so sind zwischen beiden alle Schwingungszustände repräsentirt, also auch die grösste seitliche Ausweichung nach der einen und andern Seite, folglich ein Wellenberg und ein Wellenthal. Die Wellenlänge ist also der Weg, um welchen die Schwingung vorrückt in der Zeit, in welcher ein Gewicht seine Schwingung vollendet.

Bei einem Lichtstrahl gehen die Aetherschwingungen genau in derselben Weise vor sich. Wird ein Aethertheilchen durch einen leuchtenden Körper in Bewegung gesetzt, so pflanzt sich die Bewegung nach allen Seiten hin fort, auf jeder Geraden von dem leuchtenden Körper aus. Eine einzige Bewegung genügt nicht, um unsern Augen die Lichtempfindungen zu geben, es sind eine Reihe gleichmässiger Bewegungen dazu nöthig; man nimmt

desswegen an, dass der leuchtende Körper, der die Lichtstrahlen aussendet, nach einer ersten Schwingung des ersten Aethertheilchens ihm wieder einen neuen Anstoss gibt, dann einen dritten u. s. w. Alle diese Bewegungen pflanzen sich der Reihe nach fort und gelangen schliesslich ins Auge.

So lang ein solcher Lichtstrahl in einem unkrystallisirten Körper sich bewegt, ist es gleichgültig, nach welcher Richtung hin die Schwingung vor sich geht; die Verhältnisse bleiben gleich, ob bei einem horizontal sich fortpflanzenden Lichtstrahl die Schwingungen horizontal oder vertikal oder gegen den Horizont irgendwie geneigt sind. In einem krystallisirten Mittel dagegen ist diess nicht mehr der Fall. Die Fortpflanzung der Wellenbewegung hängt von der Elasticität ab, d. h. von der Einwirkung der Kräfte, die bei Verschiebung irgend eines Theilchens durch seine Entfernung oder Annäherung in Bezug auf andere entstehen. Diese Elasticitätskräfte sind aber nach verschiedenen Richtungen verschieden gross und verschieden gerichtet. Analog dem Bisherigen kann man die Grösse der Elasticitätskräfte nach verschiedenen Richtungen in einer bestimmten Ebene durch eine Ellipse darstellen, und man hätte demnach bei jeder Verschiebung eines Aethertheilchens in der Ebene eine andere Fortpflanzungsgeschwindigkeit senkrecht zur Ebene und in Folge dessen unendlich viele Strahlen. Das ist aber nicht der Fall und rührt von dem Gesetz her, das die Elasticitätstheorie entwickelt, dass aus einer bestimmten Verschiebung eines Aethertheilchens im Allgemeinen eine Kraft entsteht, welche nicht in der Richtung der Verschiebung des Aethertheilchens wirkt, sondern mit ihr einen Winkel bildet, so dass diese Kraft die Richtung der Verschiebung beständig zu ändern sucht. Nur längs der Axen jener Ellipse entspricht der Verschiebung eines Aethertheilchens auch eine gleichgerichtete Kraft, die also dieselbe Richtung der Bewegung unterhält. Eine Bewegung eines Aethertheilchens, die nicht in der Richtung der Axe stattfindet, ändert sich beständig, kann also keinen dauernden Lichteindruck hervorbringen; nur die Bewegungen parallel beiden Axen können fortbestehen und nur Lichtschwingungen die parallel mit der Axe der Elasticität in der

Ebene gehen, können demnach auf das Auge einwirken. So oft also ein Lichtstrahl in einen Krystall tritt (mit Ausnahme der regulären), so oft theilt er sich im Allgemeinen in zwei, d. h. jeder Krystall ist doppeltbrechend, da mit dem Uebergang des Lichts in den Krystall meist Brechung verbunden ist. Jeder dieser Lichtstrahlen hat seine eigene Fortpflanzungsgeschwindigkeit, deren Grösse durch jene zwei Elasticitätsaxen bestimmt ist, und eben desswegen trennen sich die zwei Lichtstrahlen. Die Schwingungen in beiden sind innerhalb des Krystalls senkrecht auf einander. Jeder Lichtstrahl, der durch unter sich parallele Schwingungen gebildet wird, heisst polarisirt: man kann darnach sagen, dass nach jeder Richtung in einem Krystall zwei senkrecht zu einander polarisirte Lichtstrahlen mit verschiedener Geschwindigkeit sich bewegen. Ein natürlicher nicht polarisirter Lichtstrahl, wie er zunächst von einem leuchtenden Körper ausgeht, wird durch Schwingungen hervorgebracht, die nach allen möglichen Richtungen vor sich gehen, er besteht also eigentlich aus einer unendlichen Anzahl polarisirter Strahlen, was man sich wohl so zu denken hat, dass die Schwingungsrichtung beständig wechselt, da jedes Aethertheilchen in jedem Augenblick nur eine bestimmte Bewegung haben kann. Der polarisirte Lichtstrahl ist sonach das einfachere für die Vorstellung: es ist etwas ähnliches wie wir das weisse Licht als zusammengesetzt aus allen den unendlich vielen Farben uns denken.

Ehe wir weiter gehen, wird es passend sein, einen Unterschied zwischen den verschiedenen Krystallsystemen festzustellen, der uns schon bisher vorgekommen ist, bei den optischen Verhältnissen aber am schlagendsten auftritt, ich meine den Unterschied zwischen den drei- und viergliedrigen und den übrigen Krystallen. Den ersten liegt das Umdrehungsellipsoid zu Grund, den andern das dreiaxige Ellipsoid; die ersten sind „optisch einaxig“, die andern „optisch zweiaxig“, Bezeichnungen, die im Verlauf des Weitern erklärt werden. Da bei den ersten Alles viel einfacher sich gibt, so werde ich mit der Darlegung der bei ihnen vorkommenden Verhältnisse beginnen.

a) Optisch einaxige Krystalle.

Wenn in den drei- und viergliedrigen Krystallen die Anordnung des Aethers dieselbe ist, wie die der Körperatome, so ist die Elasticität um irgend einen Punkt durch ein Umdrehungsellipsoid bestimmt. Dieses Umdrehungsellipsoid wird durch eine Ebene senkrecht zur Axe des Ellipsoids in einem Kreise geschnitten, die Elasticität in dieser Ebene ist also nach allen Seiten hin dieselbe, es entspricht demnach auch jeder Verschiebung eines Aethertheilchens in dieser Ebene eine dadurch entstehende Kraft, die es in derselben Richtung zurückzuführen strebt, woraus nach den früheren Bemerkungen folgt, dass in dieser Ebene Aetherschwingungen in jeder beliebigen Richtung dauernd stattfinden können, also in der Richtung der Axe des Krystalls ein Lichtstrahl mit jeder beliebigen Schwingungsrichtung sich fortpflanzen kann. Nach allen andern Richtungen ist das nicht der Fall, es wird deswegen jene Richtung, die zugleich Hauptaxe des Krystalls ist, durch den Namen „optische Axe“ ausgezeichnet und es gibt nur eine solche optische Axe.

Schneidet man das Umdrehungsellipsoid durch eine Ebene, die nicht senkrecht zur optischen Axe ist, so erhält man als Schnitt eine Ellipse, von welcher eine Axe immer in den Aequator des Umdrehungsellipsoids fällt. (Denn ist der Axendurchmesser des Ellipsoids z. B. grösser als der Aequatordurchmesser, so ist überhaupt jeder Durchmesser des Ellipsoids grösser als der Aequatordurchmesser, also dieser immer der kleinste, also auch die kleinere Axe der Ellipse in welcher er vorkommt). Von den zwei Strahlen, die sich senkrecht zu jener Ebene im Krystall fortpflanzen können, wird also der eine immer hervorgebracht durch Schwingungen senkrecht zur optischen Axe und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieses Strahls, die durch die Grösse der entsprechenden Ellipsenaxe bedingt ist, ist immer dieselbe, welche Richtung auch die angenommene Ebene haben mag. Denkt man sich also alle möglichen Lichtstrahlen, die von einem Punkt innerhalb des Krystalls ausgehen, und jeden doppelt, weil jeder Richtung zwei Schwingungsrichtungen und zwei Fortpflanzungs-

geschwindigkeiten entsprechen, so pflanzt sich von jedem Paar einer nach allen Richtungen gleich schnell fort, gerade so wie in einem nicht krystallinischen Mittel. Dieser Strahl jedes Paares heisst deswegen der ordentliche Strahl, weil er den gewöhnlichen Gesetzen gehorcht. Nach einer bestimmten Zeit hat sich von dem angenommenen Punkte aus mittelst der ordentlichen Strahlen die Lichtbewegung bis zu einer Kugeloberfläche, deren Mittelpunkt jener Punkt ist, erstreckt. Diese Kugelfläche heisst die Wellenfläche des ordentlichen Strahls.

Der andere Strahl jedes Paares hat für verschiedene Richtungen verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, weil verschiedene Schnitte des Umdrehungsellipsoids verschiedene Ellipsen geben. Es ist aber klar, dass alle ausserordentlichen Strahlen, die mit der optischen Axe gleiche Winkel bilden, wegen der allgemeinen Symmetrie zur Axe auch gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeiten haben, so dass die Wellenfläche des ausserordentlichen Strahls jedenfalls ebenfalls symmetrisch zur optischen Axe oder eine Umdrehungsfläche ist und zwar ein Umdrehungsellipsoid, wie eine einfache geometrische Betrachtung gibt.

Die Wellenfläche des ordentlichen Strahls und die des ausserordentlichen haben nur einen Punkt gemein, der auf der optischen Axe liegt, weil sich in dieser Richtung beide gleich schnell fortpflanzen oder eigentlich gar nicht geschieden sind.

Man hat somit ein Bild der Lichtbewegung von einem Punkt aus innerhalb eines einaxigen Krystalls, wenn man sich um den Punkt eine Kugel und ein Umdrehungsellipsoid construirt, dessen Axe mit der optischen Axe zusammenfällt und auf ihr die Kugel berührt. Längs der optischen Axe findet keine bestimmte Schwingungsrichtung statt. Längs jeder andern Richtung hat man einen ordentlichen Strahl, dessen Schwingungsrichtung senkrecht zur optischen Axe und senkrecht zum Strahl ist und der nach einer bestimmten Zeit die Kugelfläche erreicht hat, und einen ausserordentlichen Strahl dessen Schwingungen senkrecht zu denen des ordentlichen vor sich gehen (und natürlich senkrecht zum Strahl) und der in derselben Zeit bis zur Oberfläche des Umdrehungsellipsoids gelangt ist.

Diese Verhältnisse, welche die Theorie an die Hand gibt, müssen genügen, um alle Erscheinungen zu erklären. Bei jeder Beobachtung gelangt aber das Licht immer zuerst in den Krystall, bewegt sich innerhalb dieses und tritt dann wieder aus. Es ist also unumgänglich nothwendig, sich noch Rechenschaft zu geben, in welcher Weise die Richtungen der Lichtstrahlen sich umändern, wenn sie aus dem Krystall in die Luft austreten oder aus der Luft in den Krystall eintreten. Es genügt uns hier, nachzuweisen, dass ein Lichtstrahl, der auf einen Krystall fällt, beim Uebergang in diesen sich in zwei senkrecht zu einander polarisirte spaltet, die nicht mehr gleiche Richtung innerhalb des Krystalls haben.

Aus der Elasticitätstheorie folgt, dass die Brechung eines Lichtstrahls beim Uebergang von einem Mittel zum andern, z. B. von Luft in Glas, da her rührt, dass die Geschwindigkeit des Lichts im einen Mittel, z. B. in Luft, eine andere ist, als im andern Mitteln, z. B. Glas, und es hat Dove ein Gleichniss für die Brechung des Lichts beim Uebergang von einem Mittel in ein anderes angegeben, das Jedermann die Sache klar machen wird. Man stelle sich eine grössere Ebene vor, auf der eine Abtheilung Kavallerie in geschlossener Linie vorrückt. Die Abtheilung gelangt an einen Theil des Felds, der frisch umgeackert und durch eine gerade Gränzlinie gegen das übrige Feld abgegränzt ist. Ist die Richtung der Bewegung nicht senkrecht zu dieser Gränzlinie, so wird z. B. der linke Flügelmann zuerst auf das frisch umgeackerte Feld gelangen, dann der nächstfolgende Mann des linken Flügels u. s. w. Wenn auch dieselbe Gangart auf dem umgeackerten Feld eingehalten wird, so werden doch die Pferde auf ihm langsamer vorwärts kommen, als vorher. Bis der rechte Flügelmann das umgeackerte Feld erreicht, hat der linke einen beträchtlich kleinern Weg auf dem schwierigern Terrain zurückgelegt, da aber die Front beibehalten werden muss, so kann auch die ursprüngliche Richtung nicht mehr dieselbe sein; weil der linke Flügelmann zurückgeblieben ist, so bildet jetzt die Front einen kleinern Winkel mit der Gränzlinie als vorher und wenn nun alle

auf dem schlechten Terrain angekommen sind, also alle in gleichem Mass langsamer vorrücken, so wird die Front wieder parallel mit ihrer Richtung vorwärtsschreiten, also in einer Richtung, die mit der Gränzlinie einen grössern spitzen Winkel als vorher bildet. Genau dasselbe erfolgt mit einem Bündel von Lichtstrahlen, das aus einem Mittel, wo die Lichtgeschwindigkeit grösser ist, in ein anderes übertritt, wo die Lichtgeschwindigkeit kleiner ist (und in der Wirklichkeit haben wir es ja immer mit einer ganzen Reihe von Lichtstrahlen zu thun, nie mit einem einzigen): die Richtung in der die Lichtstrahlen gegen die Gränze beider Mittel gelangen, wird eine andere, so dass der spitze Winkel den die ankommenden Strahlen mit der Gränze bilden, kleiner ist, als derjenige welchen die im zweiten Mittel weitergehenden mit derselben Gränze einschliessen, wenn die Geschwindigkeit in diesem zweiten Mittel eine kleinere ist. Man sieht leicht, dass das umgekehrte der Fall ist, wenn die Geschwindigkeit im zweiten Mittel die grössere ist, und dass die Abweichung der beiden Richtungen desto grösser ist, je grösser der Unterschied der Geschwindigkeit in beiden Mitteln ist und je schiefer gegen die Gränzlinie die Richtung der ankommenden Strahlen ist. Würden die Reiter oder die Strahlen senkrecht zur Gränzlinie vorrücken, so würden sie alle zu gleicher Zeit langsamer gehen, also die Richtung hinter der Gränzlinie sich nicht ändern.

Machen wir davon eine Anwendung auf Lichtstrahlen, die einen optisch einaxigen Krystall treffen. Jeder ankommende Lichtstrahl theilt sich in zwei, den ordentlichen und ausserordentlichen. Der ordentliche wird gebrochen nach den gewöhnlichen Gesetzen der Brechung für unkrystallisirte Mittel, seine Richtung lässt sich nach dem bekannten Snell'schen Gesetz bestimmen. Der ausserordentliche dagegen wird einen andern Weg einschlagen, denn wie wir vorher gesehen, ist seine Geschwindigkeit eine andere als die des ordentlichen, grösser oder kleiner, je nachdem die Wellenfläche des ordentlichen Strahls ganz innerhalb oder ganz ausserhalb der Wellenfläche des ordentlichen liegt; also wird er im ersten Fall (da überhaupt die Lichtgeschwindigkeit in einem Krystall nach der Erfahrung für den

ordentlichen und ausserordentlichen Strahl kleiner ist, als in der Luft) schwächer, im zweiten stärker gebrochen als der ordentliche, mit der einzigen Ausnahme, wenn der ordentliche mit der Axe des Krystalls zusammenfällt, weil dann mit ihm auch der ausserordentliche zusammenfällt.

Es trennt sich also (mit Ausnahme dieses besondern Falls) immer ein auf den Krystall fallender Strahl in zwei, einen ordentlichen und einen ausserordentlichen, die innerhalb des Krystalls in verschiedenen Richtungen sich bewegen, wenn auch der Winkel beider Richtungen immer sehr klein ist. Und es zeigt sich hier ein Unterschied unter den verschiedenen Krystallen, der von den Optikern durch „positiv“ und „negativ“ bezeichnet wird. Bei den positiven Krystallen, z. B. Bergkrystall, wird der ordentliche Strahl schwächer gebrochen, als der ausserordentliche, bei den negativen Krystallen, z. B. Kalkspath, ist es umgekehrt, weil bei den ersten die Wellenfläche des ordentlichen Strahls die des ausserordentlichen ganz einschliesst, bei der zweiten dagegen von der des ausserordentlichen ganz eingeschlossen ist.

Vermittelst dieser Betrachtung können wir uns nun zunächst vollkommen Rechenschaft geben über das einfachste Experiment, das man mit dem Kalkspath anstellt, um die Doppelbrechung zu zeigen. Man legt auf ein Blatt Papier mit einem dunkeln Punkt ein Kalkspathrhomboeder und sieht statt eines Punktes zwei. Wird das Rhomboeder gedreht, während es immer auf dem Papier aufliegt, so bleibt das eine Bild an seiner Stelle, das andere bewegt sich um das erste. Jenes ist das Bild des ordentlichen Strahls, denn dessen Geschwindigkeit ist nach allen Richtungen dieselbe, seine Brechung hängt nicht von der Lage des Krystalls, sondern nur von der Lage der brechenden Ebene und des Strahls ausserhalb des Krystalls ab und da diese gleich bleiben, wenn das Auge an derselben Stelle bleibt, so behält das Bild seine Lage bei der genannten Drehung. Der ausserordentliche Strahl hat nach verschiedenen Richtungen verschiedene Geschwindigkeit, seine Brechung hängt ab von der Lage der brechenden Ebene, von der Lage des Strahls ausserhalb und von der Lage der Axe. Ordentlicher und ausserordentlicher Strahl liegen im-

mer in einer durch die optische Axe gehenden Ebene, wie man sich durch den Versuch überzeugen kann. Wenn man den Krystall in der angegebenen Weise dreht, so dreht sich auch die optische Axe und die Ebene durch dieselbe und den festen ordentlichen Strahl, also muss sich auch der ausserordentliche Strahl um den letzten drehen.

Die Verbindungslinie der zwei Bilder ist parallel der kurzen Diagonale der Fläche, auf welcher das Rhomboeder aufliegt, denn diese Diagonale liegt in der Ebene durch Strahl und optische Axe. Die Schwingungen des ordentlichen Strahls erfolgen nach dem obigen parallel der langen Diagonale, die des ausserordentlichen also parallel der kurzen. Legt man auf das erste Rhomboeder ein zweites in gleicher Lage, so sieht man nicht etwa vier Bilder, sondern blos wieder zwei, die aber weiter aus einander liegen. Die Schwingungen parallel der kurzen Diagonale (oder der ausserordentliche Strahl) gehen durch das obere Rhomboeder, können aber in ihm keine Schwingungen senkrecht zur kurzen Diagonale (oder einen ordentlichen Strahl) hervorbringen, weil keine Bewegung senkrecht zu ihrer Richtung eine Wirkung ausüben kann; und ebenso gibt der ordentliche Strahl im ersten Rhomboeder wieder einen ordentlichen im zweiten, aber keinen ausserordentlichen. Man erhält also nur wieder zwei Bilder, die aber weiter auseinander liegen, weil der Weg im Krystall ein grösserer ist, also auch die divergirenden Strahlen sich weiter von einander entfernen, bis sie die letzte Grenzfläche erreichen. Haben die Rhomboeder nicht gleiche Lage, so sieht man vier Bilder: die Schwingungen des ordentlichen Strahls im ersten Rhomboeder lassen sich, wenn sie das zweite erreichen, in der Richtung der kurzen und langen Diagonale nach dem Parallelogramm der Bewegungen zerlegen, die eine Componente gibt ein ausserordentliches, die andere ein ordentliches Bild, und ebenso geben die Schwingungen des ausserordentlichen Strahls im ersten Rhomboeder Anlass zu zwei Bildern. Dreht man das obere Rhomboeder aus der mit dem untern Rhomboeder gleichen Lage um 180° , so hat man nur ein Bild, wenn die Krystalle gleich dick sind. Der Grund ist, dass

jetzt der ordentliche Strahl wieder nur einen ordentlichen, der ausserordentliche nur einen ausserordentlichen Strahl hervorbringt, und dass die Verschiebung des letzten gegen den ersten im untern Krystall gerade so gross ist, als im obern, aber nach entgegengesetzter Seite, so dass sich beide Verschiebungen aufheben.

Wenn ein Lichtstrahl auf einen durch zwei ebene, parallele Flächen begrenzten Krystall fällt, so theilt er sich in zwei, den ordentlichen und ausserordentlichen, die in verschiedener Richtung weitergehen: aber in einer Ebene durch die optische Axe liegen. Sie treffen dann die zweite Grenzfläche in zwei verschiedenen Punkten und treten also auch wieder aus dem Krystall als zwei verschiedene Strahlen aus. Nach dem allgemeinen Grundsatz der Optik, dass der Weg eines Lichtstrahls durch beliebig viele Körper hindurch immer umgekehrt werden kann, dass der Weg derselbe ist, mögen die Lichtstrahlen in der einen oder andern Richtung sich bewegen, der leuchtende Körper an das eine oder andere Ende des Wegs versetzt werden, folgt, dass jeder der austretenden Strahlen wieder ebenso gebrochen wird, wie man sich den einfallenden durch Brechung aus dem gebrochenen entstanden denken kann, d. h. der austretende Lichtstrahl erhält wieder dieselbe Richtung wie der einfallende. (Es gilt diess jedoch nur, weil der Strahl innerhalb des Krystalls gleiche Lage zu beiden Grenzflächen hat, d. h. weil die Grenzflächen parallel sind). Die zwei austretenden Lichtstrahlen sind also getrennt, aber parallel unter sich und mit dem einfallenden Strahl.

Denkt man sich einen zweiten in gleicher Richtung einfallenden Strahl, so theilt sich dieser wieder in zwei innerhalb des Krystalls, und gibt beim Austreten zwei dem einfallenden parallele Strahlen. Man kann offenbar immer den zweiten einfallenden Strahl so legen, dass zwei der austretenden Strahlen zusammenfallen, entweder die zwei ordentlichen oder die zwei ausserordentlichen, oder ein ordentlicher und ein ausserordentlicher. Würden die zwei ordentlichen oder die zwei ausserordentlichen austretenden zusammenfallen so müssten sie auch innerhalb des Krystalls zusammenfallen und daher nothwendig auch die zwei einfallenden, d. h. man hätte in der That nur einen einfallenden.

Wenn dagegen ein ordentlicher und ein ausserordentlicher aus tretender zusammenfallen, so fallen sie im Krystall nicht zusammen, treffen die zweite Grenzfläche in verschiedenen Punkten, müssen also von zwei verschiedenen einfallenden Strahlen her rühren. Denkt man sich das Auge in die Richtung des zusammenfallenden ordentlichen und ausserordentlichen Strahls gestellt, so erhält es gleichzeitig den Eindruck beider Strahlen, die hinter dem Krystall vereinigt, im Krystall und vor dem Krystall dagegen getrennt sind, also verschiedene Wege zurückgelegt haben.

Wenn zwei Lichtstrahlen, die wenig von einander entfernt und ungefähr parallel sind, von einem leuchtenden Körper ausgehen, so ist anzunehmen, dass ihr Schwingungszustand am Ausgangspunkt derselbe ist, d. h. dass die Aethertheilchen des einen dieselbe Bewegung in Grösse und Richtung haben wie die des andern. Dasselbe wird dann aber auch stattfinden in beliebigen aber auf beiden Strahlen gleichen Entfernungen von der Lichtquelle. Wenn nun diese zwei Lichtstrahlen einen Krystall treffen, so theilt sich jeder in einen ordentlichen und einen ausserordentlichen innerhalb des Krystalls und es treten vier verschiedene Strahlen aus dem Krystall aus. Nehmen wir an zwei davon fallen zusammen, ein ordentlicher und ein ausserordentlicher, so haben diese wenn sie in das Auge gelangen, nach dem eben Gesagten verschiedene Wege zurückgelegt, es wird also auch im Allgemeinen ihr Schwingungszustand nicht mehr derselbe sein. Einmal sind sie rechtwinkelig zu einander polarisirt, d. h. sie schwingen in zwei zu einander senkrechten Ebenen und zweitens wird die Verschiebung der Aethertheilchen an gleichen Stellen im Allgemeinen bei den zwei Strahlen eine verschiedene sein, weil das betrachtete Aethertheilchen des einen Strahls — längs des Wegs, den dieser Strahl zurücklegt, gerechnet — weiter von der Lichtquelle entfernt ist, als das des andern. Unser Auge ist nicht fähig, die Schwingungsrichtung oder den Schwingungszustand eines Lichtstrahls zu erkennen: es erhält denselben Licht Eindruck ob die Schwingung der Aethertheilchen horizontal oder vertikal oder in anderer Richtung stattfindet. Es bedarf also künstlicher Mittel um die Richtigkeit unserer Folgerungen nach-

zuweisen. Diese künstliche Mittel sind Polarisationsmittel d. h. durchsichtige Körper, welche nur Schwingungen von bestimmter Richtung durchlassen, z. B. Turmalinplatten parallel zur Axe geschnitten, welche die Eigenschaft haben, dass sie nur den einen der zwei Strahlen durchlassen, den andern nicht, oder Nicol'sche Prismen, welche aus Kalkspath so construirt sind, dass nur der ausserordentliche Strahl durchgelassen, der ordentliche an einer Kittschicht, die den nach passender Richtung zerschnittenen Krystall wieder verbindet, vollständig zurückgeworfen wird.

Bringt man ein solches Polarisationsmittel vor das Auge, so werden die zwei vorher besprochenen Strahlen noch einige Modificationen erleiden, ehe sie in das Auge gelangen. Der Anschaulichkeit wegen wollen wir annehmen, der eine der Strahlen werde durch horizontale, der andere durch vertikale Schwingungen gebildet. Ist das Polarisationsmittel so gestellt, dass es nur horizontale Schwingungen durchlässt, so wird der zweite Strahl für das Auge vernichtet, was aber höchstens an der kleineren Lichtintensität erkannt werden könnte, da das Auge keinen Sinn für Richtung der Schwingungen hat. Ist das Polarisationsmittel so gestellt, dass es nur vertikale Schwingungen durchlässt, so wird der erste Strahl für das Auge vernichtet und die Lichtempfindung ist genau dieselbe wie vorher. Lässt das Polarisationsmittel nur Schwingungen durch, die gegen Horizont und Vertikale gleich geneigt sind, so geht von jedem Strahl ein bestimmter Theil durch. Man kann nemlich die horizontale Schwingung des ersten Strahl nach jener Mittelrichtung und senkrecht dazu zerlegen — die erste Componente geht durch das Polarisationsmittel, die zweite nicht — und ebenso die vertikale Schwingung des zweiten. Jetzt hat man zwei Schwingungen in derselben Ebene, die in das Auge gelangen können. Diese zwei Schwingungen haben aber nach dem Früheren im Allgemeinen verschiedenen Schwingungszustand. Wäre der Schwingungszustand derselbe, d. h. würde ein Aethertheilchen in Folge beider nach gleicher Richtung und gleich stark schwingen, so würde die vereinigte Lichtwirkung eine im Verhältniss zu jeder einzelnen verstärkte sein. Ist der Schwingungszustand verschieden, so wird die vereinigte

Lichtwirkung kleiner sein, als im eben betrachteten Fall, weil theilweise entgegengesetzte Bewegungen der Aethertheilchen vorkommen, und ist der Schwingungszustand in der Art verschieden, dass durch den einen Strahl ein Wellenberg hervorgebracht wird an derselben Stelle wo der andere ein Wellenthal hervorbringt, so erhalten überall die Aethertheilchen gleiche aber entgegengesetzte Bewegungen, die sich aufheben. Man hat keine Bewegung also auch keine Lichtempfindung. (Licht und Licht heben sich auf und daraus folgt, dass Licht kein Stoff sein kann, sondern in einer Bewegung bestehen muss). Diess ist der Fall, wenn die Wellenberge des einen Strahls mit den Wellenthälern des andern zusammen treffen, d. h. weil ein Wellenberg und ein Wellenthal zusammen eine ganze Welle geben, wenn der eine Strahl gegen den andern um eine halbe Wellenlänge oder andert-halb oder zwei und ein halb u. s. w. Wellenlängen vor oder zurück ist. Diese Entstehung von Dunkelheit ist das einzige Mittel, durch das wir uns von der Verschiedenheit zweier Schwingungszustände überzeugen können. Bei entgegengesetztem Schwingungszustand zweier Strahlen—die in einer Ebene schwingen und von derselben Lichtquelle ausgehen, entsteht Dunkelheit. Ob die Schwingungszustände entgegengesetzt sind, das hängt von den Weglängen ab, die jeder der Strahlen zurückgelegt hat, oder eigentlich nur von dem Unterschied dieser Weglängen, von dem „Gangunterschied“, so dass wir den Satz haben: Wenn zwei in einer Ebene schwingende Strahlen, die von derselben Lichtquelle ausgehen, einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge oder einer Zahl von ganzen nebst einer halben Wellenlänge haben, so heben sie sich auf, geben kein Licht.

Wir sind nun im Stande, einen Einblick zu thun in die schönen Erscheinungen, welche Krystallplatten in polarisirtem Lichte zeigen. Denken wir uns eine Krystallplatte mit zwei ebenen, geschliffenen Flächen, die auf der Hauptaxe oder optischen Axe des Krystalls senkrecht stehen, und stellen uns diese Flächen horizontal vor. Sehen wir nach irgend einer Richtung gegen die Platte, so erhalten wir in dieser Richtung zwei zusam-

menfallende Strahlen mit bestimmtem Gangunterschied in das Auge. In jeder andern Richtung, die mit der optischen Axe derselben Winkel bildet, müssen zwei Strahlen mit dem gleichen Gangunterschied ins Auge gelangen. In der Richtung der Axe findet kein Gangunterschied statt, je mehr man sich von der Axe entfernt, desto grösser wird der Gangunterschied, weil nach derselben Seite hin der Unterschied in der Geschwindigkeit des ordentlichen und ausserordentlichen Strahls immer grösser wird und daher auch der Unterschied in der Brechung. Das Auge erkennt aber noch keine Verschiedenheit nach verschiedenen Richtungen. Das austretende Licht muss genöthigt werden, in einer und derselben Ebene zu schwingen. Diess geschieht, indem man es durch ein Polarisationsmittel gehen lässt. Jetzt wird nach allen den Richtungen, nach welchen der Gangunterschied eine halbe Wellenlänge oder eine Anzahl ganzer und eine halbe Wellenlänge beträgt, kein Licht das Auge treffen. Das Auge sieht gegen den Krystall gerichtet die Mitte hell, dann weil der Gangunterschied von der Axe an nach allen Seiten gleichmässig zunimmt, in einiger Entfernung von der Mitte einen dunkeln kreisförmigen Ring, dann wieder einen hellen, einen dunkeln u. s. w.

In der That aber sieht man nicht abwechselnd helle und dunkle Ringe, sondern verschiedenfarbige. Diess rührt daher, dass jede Farbe ihre besondere Wellenlänge hat und also auch verschieden weite Ringe. Wenn man einfarbiges Licht anwendet, indem man durch ein rothes, ein violettes u. s. w. Glas sieht, so sieht man abwechselnd helle und dunkle Ringe, die aber für verschiedene Farben verschiedene Dimensionen haben: für roth sind die Ringe am weitesten, für violett am engsten. Bei weissem Licht erhält man daher eine Mischung von einer ganzen Reihe von Farbensystemen. Käme es bei den Dimensionen der Ringe blos auf die Wellenlänge an, so müssten alle Krystalle dieselbe Erscheinung zeigen, das ist aber nicht der Fall und rührt daher, dass in den Krystallen so gut wie in verschiedenen Glassorten und allen durchsichtigen Körpern verschiedene Dispersion des Lichts stattfindet. Flintglas und Crownglas geben im

Spektrum dieselbe Reihenfolge der Farbe, aber bei Crownglas sind roth, gelb und grün viel ausgebreiteter als bei Flintglas. Es scheinen sogar bei Krystallen Fälle vorzukommen, bei denen die gewöhnliche Farbenreihe nicht eingehalten wird, z. B. Apophyllit. Während die meisten farblosen Krystalle von der Mitte aus ungefähr die Farbenreihe: bläulich, gelb, braunroth, blau, grün, gelbroth, grün u. s. w. zeigen, hat der Apophyllit die Farbenreihe: weiss, violet, grüngelb, die sich immer wiederholt. Nörrenberg hat die interessante Beobachtung gemacht, dass beim Aufeinanderlegen zweier Krystalle, deren einer unterschwefelsaurer Kalk, der andere unterschwefelsaures Bleioxyd ist, dasselbe Ringsystem entsteht, wie bei Apophyllit, dass also die Gesamtwirkung beider die gleiche Dispersion gibt, wie Apophyllit. Wenn der gelblich-grüne Vesuvian eine Abwechslung von gelben und grünen Ringen gibt, so liegt diess daran, dass wie die Farbe schon zeigt, alle andern Farben beim Durchgang durch den Krystall grossentheils absorbirt werden.

Ausser der eigenthümlichen Lichtbewegung in den Krystallen kommen also hier noch zwei Eigenschaften ins Spiel, die der Krystall mit jedem unkrystallinischen Mittel theilt: die Dispersion oder die verschiedene Brechung der Farben in verschiedenen Stoffen und die Absorption, in Folge welcher bestimmte Farben gar nicht durch den Krystall durchgehen.

Es bleibt jedoch noch eins zu erwähnen übrig: würde man den Versuch in der oben angegebenen Weise machen, so würden die Ringsysteme nur schwach oder kaum gesehen werden. Bekanntlich wendet man immer zwei Polarisationsmittel an, zwischen welche der Krystall gestellt wird. Es wird also das ankommende Licht polarisirt, tritt in den Krystall, wird nach dem Austreten genöthigt, wieder in einer Ebene zu schwingen und gelangt dann erst in das Auge. Die Erklärung dessen, was bei dieser Anordnung noch zum Ringsystem hinzukommt, wird auch deutlich machen, warum natürliches Licht als einfallendes die Ringe unvollkommen zeigt.

Man denke sich durch das Auge als Spitze einen Kegel ge-

legt, der einen der Ringe zur Basis hat. In jeder Mantellinie des Kegels fallen zwei Strahlen zusammen, ein ordentlicher und ein ausserordentlicher: die Schwingung des ersten geschieht parallel den Halbmessern des Rings, die des zweiten parallel den Tangenten an den Ring. Wenn nun Schwingungen mit bestimmter Richtung, z. B. von rechts nach links, einfallen, so wird längs des Durchmessers des Rings, der ebenfalls von rechts nach links geht, nur eine Schwingung in dieser Richtung stattfinden können, also nur ein ordentlicher Strahl, kein ausserordentlicher sich längs der Mantellinien bewegen, die zu den Endpunkten jenes Durchmessers führen. Bei dem darauf senkrechten Durchmesser sind nur Schwingungen tangential an den Ring möglich, also nur ein ausserordentlicher Strahl. Zwischenhinein wird ein allmählicher Uebergang stattfinden.

Ist nun das zweite Polarisationsmittel so gestellt, dass es dieselben Schwingungen durchlässt, die von rechts nach links, so müssen die zwei genannten Durchmesser weiss erscheinen, weil nur je ein Strahl von ihnen aus ins Auge gelangt, der nicht durch einen andern aufgehoben werden kann. Zwischen dem weissen Kreuz werden dagegen die Ringe sich bilden. Die Ringe sind also durch ein weisses Kreuz durchschnitten. Wenn dagegen das zweite Polarisationsmittel nur Schwingungen von vorn nach hinten, senkrecht zur Richtung von rechts nach links, durchlässt, so werden die von jenen Durchmessern kommenden Strahlen nicht ins Auge gelangen können, weil sie Schwingungen von rechts nach links machen, also erhält man ein schwarzes Kreuz, welches die Ringe durchzieht. Zugleich ergibt sich, dass im letzten Fall überhaupt die ganze Erscheinung die complementäre von der des ersten Falls ist, so dass beide Erscheinungen, wenn man sie zugleich sehen würde, eine gleichmässig erhellte Fläche ohne Kreuz und Ringsystem geben würden. Und das ist nun auch der Fall, wenn natürliches Licht einfällt. Natürliches Licht hat man sich zu denken als bestehend aus Lichtschwingungen, die beständig ihre Richtung wechseln, nicht in einer Ebene bleiben, wie beim polarisirten Licht. Es ist also, als ob das Pola-

risationsmittel sehr schnell hinter einander alle möglichen Lagen erhalten würde und da je zwei zu einander rechtwinklige Lagen complementäre Erscheinungen geben, so ist das Endresultat eine Ueberdeckung einer Reihe von complementären Farben, das heisst, eine gleichmässige, weisse Färbung, da der Eindruck jeder einzelnen Stellung im Auge immer einige Zeit fortdauert.

Gewöhnlich beobachtet man die Ringerscheinung, indem man die Krystallplatte zwischen zwei Turmalinen dicht vor das Auge bringt, so dass es möglich ist, Lichtstrahlen in das Auge aufzunehmen, welche in sehr verschiedenen Richtungen durch den Krystall hindurchgehen, also eine grosse Zahl von Ringen zu übersehen. Wenn aber die Doppelbrechung nur schwach ist, so muss man, um nur den ersten Ring um die optische Axe beobachten zu können, schon sehr schief durch den Krystall durchsehen, der Ring erscheint unter sehr grossem Schwinkel. Will man in diesem Fall das Ringsystem ordentlich übersehen, es möglichst vollständig ins Gesichtsfeld bringen, so bedient man sich des Polarisationsmikroskops. In diesem Instrument wird das einfallende polarisirte Licht durch eine oder mehrere starke Glaslinsen zum Convergiere gebracht, so dass die Lichtstrahlen in den schiefsten Richtungen durch den Krystall gehen und das aus dem Krystall austretende divergirende Licht wieder durch eine oder mehrere starke Glaslinsen nahe zum Parallelismus zurückgeführt. Diese Strahlen gehen jetzt durch das zweite Polarisationsmittel und gelangen nun ins Auge. Die Ringe des Kalkspaths erscheinen in diesem Instrument ganz nahe zusammengedrängt, weil bei diesem die Doppelbrechung sehr stark ist, bei einer Reihe anderer Krystalle würde man dagegen ohne das Polarisationsmikroskop vergebens nach Ringen suchen

(Schluss im nächsten Jahrgang.)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg](#)

Jahr/Year: 1865

Band/Volume: [21](#)

Autor(en)/Author(s): Zech P.

Artikel/Article: [Die physikalischen Eigenschaften der Krystalle. 227-273](#)