

Physikalische Kristallographie.

I. Kohäsionsverhältnisse. Die Annahme einer Struktur der Kristalle nach Art der regelmäßigen Punktsysteme macht es von vornherein selbstverständlich, daß der Zusammenhalt ihrer Teilchen mit der Richtung wechselt. Druck-, Zug-, Biegungs- und Drillingsfestigkeit von Stäben muß verschieden sein, je nach deren ehemaliger Lage im Kristall. So wird es denn auch gefunden.

Eine höchst charakteristische, dem Versuch leicht zugängige Eigenschaft Spaltbarkeit. vieler Kristalle ist es, parallel den Flächen bestimmter kristallographischer Gestalten sich zerteilen zu lassen. So zerspringt ein jeder Kalkspat durch Schlag in Rhomboeder mit $74^{\circ}55'$ Polkantenwinkel, Bleiglanz in Würfel, Flußspat läßt sich in Oktaeder zerteilen. Nicht immer sind Spaltkörper rundum geschlossene Kristallgestalten, z. B. nicht beim Glimmer, der nach einer einzigen Fläche, der Basis, spaltet, auch nicht bei der monoklinen Hornblende, die sich nach einem oben und unten offenen Prisma zerlegen läßt. Zuweilen geht die Blättrigkeit in verschiedenem Grade der Deutlichkeit parallel den Flächen mehrerer Gestalten; so ist es beim orthotrimetrischen Anhydrit, der sich nach dem 1., 2. und 3. Pinakoid zerteilt; man kann ihn also in würfelige Gebilde zerlegen, bei denen aber die Güte der Spaltung nach dem 1. Pinakoid der nach dem 2. und 3. nachsteht.

Offenbar sind die Spaltflächen Ebenen, zu denen senkrecht Richtungen minimalen mechanischen Zusammenhaltes im Kristall verlaufen. Ein Zug, sei er hervorgerufen durch angehängte Gewichte oder, wie es beim Spaltversuch üblich ist, durch Einpressen eines Keiles, etwa eines Messers, reißt die Teilchen nach der Spaltebene auseinander, in anderen Richtungen erzielt man lediglich unebenen Bruch. Die Sprödigkeit des Materials, die bei amorphen Stoffen nach allen Richtungen gleich verteilt ist, offenbart sich also bei spaltbarer kristalliner Materie mit besonderer Ausprägung in orientierten Ebenen regelmäßig sprunghaft wechselnd.

Als Gegenstück zur Spaltbarkeit handelt es sich bei der besonders von O. Translation und Plastizität. Mügge in ausgezeichneten Studien behandelten Eigenschaft der Translation um die überraschende Fähigkeit vieler Kristalle parallel bestimmten kristallographischen Ebenen, die man sich wie Gleitbahnen denken kann, ohne Aufhebung des Parallelismus der Teilchen verschoben werden zu können. Wie man die Spaltflächen als Ebenen großer Sprödigkeit auffassen kann, so erscheinen die Flächen der Translation als solche großer Plastizität.

Ein schönes Beispiel ist in der Hinsicht das Eis, dessen nach der Basis plattige Kristalle eine Verschiebung nach beliebigen Richtungen in der Tafel-ebene erlauben. Wie hier sind auch sonst die Translationsflächen durch einfache Indizes ausgezeichnet; sie werden, wie die Spaltflächen, durch Netzdichte bevorzugte Ebenen im Raumgitter sein. Diese Möglichkeit des Abschiebens parallel der Translationsfläche T und dabei meist nach einer bestimmten Richtung t in dieser Ebene erklärt übrigens die eigentümliche Biegsamkeit mancher

Kristalle; sie läßt sich z. B. ganz vortrefflich deutlich am orthotrimetrischen Antimonglanz zeigen, dessen Spaltblättchen nach der Translationsfläche leicht um Achse *a* gekrümmt, im übrigen auch um Achse *c* gedreht werden können. Ähnlich verhält sich der Gips. Vielfach bedecken sich bei solchen Vorgängen die Kristalle mit einer äußerst feinen „Translationsstreifung“ parallel zu *T*; auf Flächen der Zone *t* wird sie nicht beobachtet.

Bei hochsymmetrischen Systemen, insbesondere beim isometrischen, hat man, wenn überhaupt Translation vorliegt, immer eine große Anzahl von Abschiebungsflächen im selben Kristalle, z. B. beim Steinsalz deren sechs, die nach dem Rhombendodekaeder geordnet sind. In solchen Fällen der Translation hochsymmetrischer Körper kommt es bei Deformationen zu sehr weitgehenden bruchlosen Umformungen. In der Tat findet man gelegentlich Steinsalzkristalle in Salzton, die durch den Druck der hangenden Schichten aus ihrer einstigen Würfelgestalt in mannigfaltige Formen scheinbar trikliner, monokliner, orthotrimetrischer oder rhomboedrischer Art gebracht wurden, ohne zu zerbrechen, eine auf den ersten Blick höchst überraschende scheinbare Abweichung vom Gesetz der Konstanz der Neigungswinkel. Die Spaltbarkeit geht durch die deformierten Kristalle einheitlich hindurch. Eine ähnlich große Rolle spielt die Translationsfähigkeit kristallinen Materials beim Formen der Metalle durch Schmieden.

Erhöhung der
Plastizität beim
Erwärmen.

Die zu solchen plastischen Umformungen nach bestimmten Ebenen erforderlichen Kräfte sind wohl noch nicht messend verfolgt. Bei manchen Substanzen ist die hierzu nötige Kraftleistung sehr gering, sie sind leicht biegsam trotz kristalliner Natur. Dafür ist der Talk ein Beispiel, ein noch besseres der Koenenit, dessen Tafeln wie feuchtes Fließpapier zusammengeknüllt und wieder ausgeglättet werden können, ohne zu zerreißen. Andere sprödere Kristalle werden bildsam bei Erhöhung der Temperatur. Das zeigen in überraschender Weise interessante Versuche L. Milchs am Steinsalz. Es gelingt ganz leicht, Säulen dieses Minerals bei einigen hundert Wärmegraden schraubenartig ohne Bruch zu drillen und kreisförmig zu biegen. Auch ist es ja eine allgemeine Erfahrung, daß Pressen und Schmieden an glühendem Eisen ungemein viel leichter sich ausüben läßt als am kalten Material. Wesentlich für den Effekt ist außer der Temperatur natürlich die Zeit; wie bei schnellem Biegen eine Stange Siegelack bricht, sie hingegen, lange Zeit nur an beiden Enden gestützt, sich verkrümmt, so ist es auch bei den Kristallen; es gelingt z. B. Steinsalzstäbe bei gewöhnlicher Temperatur nach und nach mehr und mehr bruchlos zu biegen. Weiterhin ist nicht zu verkennen, daß ein Umhülltsein von schwer nachgebendem Material das Brechen hintenansetzt. Es ließ sich das bei Versuchen des Verfassers erkennen, bei denen Kalkspat oder Steinsalz unter gewöhnlicher Temperatur mit Paraffin umgossen und in Kupferhülsen eingeschlossen umgestaltet wurden. Man bringt dabei die weitgehendsten Deformationen zuwege, die äußerlich ohne Bruch erscheinen. Beim Steinsalz ist das auch wirklich der Fall, es läßt sich unter den erwähnten Umständen stauchen, biegen und zerknüllen wie ein Tuch, ohne den Zusammenhang zu verlieren, ja ohne seine klare

Durchsichtigkeit einzubüßen. Beim minder plastischen Kalkspat zeigt das Mikroskop, daß zwar stellenweise, soweit das Auflösungsvermögen der Objektivsehe gestattet, bruchlose Umformungen sich vollzogen, andernorts aber auch Systeme von Sprüngen das Präparat zerklüfteten.

Von allergrößtem Interesse ist in der Hinsicht, die Umformungen der Gesteine in der Natur zu studieren. In der Tat treten ganz gewaltige, mehr oder minder plastische Verschiebungen mancher großer geologischer Körper in tektonischen Profilen heraus. Insbesondere interessant sind die von F. Beyschlag und H. Everding, H. Stille, E. Geinitz u. a. meisterhaft studierten Stauungen, Quetschungen und Auswalgungen von Steinsalzlagern Deutschlands, die stellenweise, z. B. bei Staffurt, zu Mächtigkeiten von vielen hundert Metern zusammengepreßt, andernorts zu dünnen Lagen ausgezerrt sind. In gewissen Zügen, z. B. des Allertals, sind die plastischen Salzmassen, förmlich eruptiven Gangbildungen gleichend, in Spaltenzüge von unten in mächtigen Schlingen eingeschoben. Nach der Meinung von E. Harbort und S. Arrhenius hat sie das gewaltige Gewicht der lastenden hangenden Gesteinsmassen an den Bruchzonen hochgepreßt, so daß ein schönes Beispiel der Wirkung gestörter Isostasie in der Erdkruste vorläge. Gelegentlich scheinen überlagernde Gesteine vom aufdrängenden Salze in domartig gewölbte Form gehoben zu sein, ein Vorgang, welcher der Bildung von Eruptivlakkolithen und ihrer rundum abfallenden Hülle entspricht.

Umformung von Gesteinen durch Gebirgsdruck.

Mit der Erscheinung der Spaltbarkeit verwandt ist die der Schlag- und Druckfiguren. Treibt man nach der Anweisung von E. Reusch mit kurz bemessenem Schläge eine Nadel senkrecht in eine dicke Spaltplatte von Steinsalz, so bildet sich als Schlagfigur ein vierstrahliger, rechtwinkliger Stern, aus Sprüngen bestehend, die jeweils 45° mit den gleichfalls rechtwinkligen Spalt- rissen nach dem Würfel einschließen; sie verlaufen Ebenen des Rhombendodekaeders parallel. Die sorgfältige Betrachtung dieser Erscheinung lehrt, daß um das entstandene Loch herum die Steinsalzteilchen quadrantenweise in den Armen der Figur wechselnd nach dem Zentrum der Erscheinung zu herausgepreßt und mit feinen Streifen versehen sind. Es handelt sich also dabei um eine Biegung unter dem Einfluß der Translation nach den vier zur Platte unter 45° geneigten Rhombendodekaederflächen.

Schlag- und Druckfiguren.

Auf Spaltblättchen von Glimmer erhält man durch die Körnerprobe einen sechsstrahligen Stern mit einem längeren Arm parallel zur Achse a. Durch Anwendung eines rund abgeschmolzenen Glasstäbchens kann man zur Schlagfigur eine „Biegungsfigur“ gesellen, die, gleichfalls sechsstrahlig, mit ihren Armen den Winkel der ersteren halbiert. Abgesehen vom langen Strahl der Schlagfigur entsprechen die Sprünge Flächen, welche schräg in die Basis einschneiden.

Wohl eine der interessantesten Erscheinungen auf dem Gebiete der Mineralogie ist der Umstand, daß man durch Druck bei manchen Kristallen ein Verschieben von Teilchen parallel bestimmten Ebenen bewirken kann, das aber nicht wie bei der Translation unter Innehaltung des Parallelismus des ruhenden und des bewegten Kristallteils vor sich geht, sondern mit einer Überführung des

Zwillings-
gleitung.

verschobenen Stückes in Zwillingstellung zum Rest verbunden ist. Man nennt diesen Vorgang einfache Schiebung oder besser Zwillingsschiebung. In seiner Allgemeinheit ist er von O. Mügge erkannt worden, der ein schönes Beispiel trikliner Art im Baryumcadmiumchlorid ($\text{BaCdCl}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) studiert hat. In Kürze vermerkt liegen die Verhältnisse stets so, daß der Effekt einfacher Schiebung in der Bildung einer der beiden Haupttypen der Zwillingbildung (S. 582) besteht, d. h. der verschobene und der in seiner Lage unveränderte Teil sind gesetzmäßig verbunden nach einer Zwillingfläche Z oder nach einer Zwillingachse Z .

Bei höher symmetrischen Kristallen ändern sich die Umstände entsprechend dem gleichmäßigeren Bau, so z. B. beim Kalkspat, dem klassischen Körper für einfache Schiebung. Seine eigenartige dem Experiment sehr leicht zu unterwerfende Deformationsfähigkeit wurde schon von D. Brewster (1815), F. Pfaff

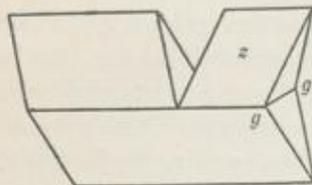


Fig. 28. Zwillingsschiebung bei Kalkspat.

(1857) und E. v. Reusch (1867) beobachtet, insbesondere aber von H. Baumhauer (1879) und O. Mügge (1883) durch systematische Versuche und theoretisch aufgeklärt. Preßt man senkrecht zu einer Polkante des Spaltrhomboeders (Fig. 28) eine Messerschneide, so wird durch diesen eindringenden Keil ein Teil des Kristalls nach der Ebene $gg = Z$ in Zwillingstellung abgeschoben. Die Fläche ist also eine Gleitfläche des Kalkspats.

Drückt man die Messerschneide weiter in den Kristall, so schreitet der Vorgang voran; tiefer gelegene Teile geraten in Zwillingstellung und nehmen die oberen bereits früher verschobenen auf sich als Unterlage fort. Ersichtlich ist der merkwürdige Vorgang also aus einer Zwillingsschiebung und einer Translation zusammengesetzt.

Elastizität und Festigkeit.

Bezüglich der Elastizitäts- und der Festigkeitsverhältnisse hinsichtlich Druck und Zug sei hier nur andeutungsweise vermerkt, daß auch alle diese Umstände experimentell und theoretisch bei Kristallen als mit der Richtung wechselnd erkannt sind. Zu beachten ist, daß es sich bei den Elastizitätsversuchen um homogene Deformationen handelt, die zentrisch symmetrisch sind; ein Unterschied in bezug auf Richtung und Gegenrichtung ist nicht vorhanden. Alle Kristallgruppen, bei denen geometrisch in derselben Richtung Verschiedenheiten auftreten, sind in ihren Elastizitätseigenschaften nicht als eigene Abteilungen erkannt. Die tetraedrisch hemiedrischen Körper z. B. bekunden sich wie die holodrischen. Besonders interessant ist, daß die isometrischen Stoffe sich unter allseitig gleichem Druck wie amorphe verhalten, d. h. eine Kompression unter Erhaltung der Winkel erfahren, während alle übrigen Kristalle dabei ihre Gestalt goniometrisch verändern.

Die Druck- und Zugfestigkeiten von Mineralien sind, wie Verfasser sich überzeugte, z. T. außerordentlich groß. Ein Quarzwürfel von 1 qcm Tragfläche hielt einen Druck von fast 15 000 kg aus. Streifen aus Glimmerspaltblättchen nach der Basis und zwar längs Achse a geschnitten, ergaben eine Zugfestigkeit

von 31 kg/qmm, solche, die nach Achse b gestreckt waren, 25 kg/qmm. Es sind das Zahlen, wie sie für Schmiedeeisen zutreffen.

Die großen Festigkeiten gegenüber Druck findet man bei den Gesteinen als Mineralaggregaten wieder. Der Granit, ein Gemenge von wesentlich Quarz, Feldspat und Glimmer, zeigt im frischen Zustande bei Mittelkorn Festigkeitszahlen von etwa 1500—2500 kg/qcm. Bei Basalt sind Werte bis 5000 kg/qcm gefunden.

Ganz andere Verhältnisse als bei den Mineralien hat man aber bei den Gesteinen bezüglich der Zugfestigkeit; sie ist bei ihnen im allgemeinen sehr gering, etwa nur $\frac{1}{30}$ der Druckfestigkeit. Die Erklärung liegt in dem Umstande, daß beim Zug der Bruch einer Gesteinssäule im allgemeinen nicht durch die Mineralindividuen geht, sondern an ihrer Grenze her. Es handelt sich also dann lediglich um die Überwindung der Adhäsion und der Verzahnung, also wesentlich um eine Aggregat- und nicht um Individualfestigkeit.

Ein bedeutsamer Umstand bei solchen Bestimmungen ist es, daß nach ausgedehnten Experimenten, besonders L. Prandtls und des Verfassers, die Druckfestigkeitszahlen, im Gegensatz zu den Ergebnissen bei Zugversuchen, sehr wesentlich von der Länge der Probestücke abhängen. Platten ergeben oft weit höhere Festigkeiten als Würfel und diese wieder andere als Säulen. Es liegt das an dem Einfluß, den die kräftig an die Enden der Probe gepreßten Druckplatten der Maschine auf die ihnen benachbarten Teile des Versuchskörpers ausüben. An diesen Stellen steht dem seitlichen Ausweichen der oben und unten gepreßten Proben eine gewaltige Reibung entgegen; sie werden hier durch die Platten des Druckapparates sehr kräftig zusammengehalten; ihr Widerstand gegen Zerbrechen ist also bedeutend. Im Verhältnis zum Ganzen sind die vor Bruch mehr als die Mitte der Probe geschützten Endteile aber bei Platten offenbar weit ausgedehnter als bei Würfeln und Säulen; daher weisen niedrige Probestücke eine viel größere Festigkeit auf als hohe. Erst von einer bestimmten mit dem Material wechselnden Länge an findet man die gleichmäßigen Zahlen der „Idealfestigkeit“.

Verwickelter als die Umstände der Druck- und Zugfestigkeit der Mineralien ^{Härte.} ist das Wesen ihrer Härte; denn so einfach es zunächst erscheinen mag, so schwierig ist es im Grunde doch schon zu sagen, was Härte sei. Offenbar handelt es sich um einen mechanischen Widerstand, den ein Körper ausübt gegen — und darin liegt nun gleich die Unbestimmtheit — Verletzungen durch Ritzen, Schaben, Schleifen, Eindringen einer Nadel, eines Bohrers oder gegen anders gestaltete, mechanisch nicht gleichwertige Operationen. Die Frage also, was „Härte“ sei, ist mit solchen Beschreibungen nicht erledigt.

In der Mineralogie benutzt man zumeist die Ritzprobe und erforscht, ob bzw. bei feineren Untersuchungen unter welcher Belastung eine Stahlnadel oder eine Diamantschneide eine Fläche eben verletzt oder wann ein Strich bestimmter Breite erzielt wird. Für den Zweck hat man besondere Ritz-Sklерometer gebaut. Als Probekala nach F. Mohs verwendet man für den Vergleich eine Reihe von Mineralien wechselnder Härte, nämlich 1. Talk, 2. Steinsalz,

3. Kalkspat, 4. Flußspat, 5. Apatit, 6. Feldspat, 7. Quarz, 8. Topas, 9. Korund, 10. Diamant. Quarz hat also Härte 7. Die Intervalle sind sehr ungleich.

Mittels der Sklerometer ließ sich die molekularstrukturell sehr wichtige Tatsache feststellen, daß verschiedene Flächen eines Kristalls ungleich ritzbar sind, ja daß diese Ritzbarkeit auf derselben Fläche mit der Richtung wechseln kann. Es zeigte sich, daß solche Verschiedenheiten mit der Spaltbarkeit zusammenhängen. Den Schleifern von Diamant war es längst bekannt, daß dieser Edelstein auf den Oktaederflächen, nach denen er einen Blätterbruch besitzt, nicht so widerstandsfähig ist wie auf denen des Würfels. Schneidet eine Spaltbarkeit zu einer Fläche senkrecht ein, so ist die Härte beim Ritzen parallel zu den Spaltungsspuren am geringsten, senkrecht dazu am größten. Verläuft ein Blätterbruch schief zu einer Fläche, so ist der Richtungssinn nicht gleichgültig, in welchem der Ritzversuch senkrecht zur Spaltungsspur geführt wird.

Recht anschaulich werden diese Verschiedenheiten auf derselben Kristallfläche durch Kurven wiedergegeben, die man erhält, wenn der Wechsel des Widerstandes durch entsprechende Länge von Richtungslinien auf einer Fläche ausgedrückt wird. Ist keine Verschiedenheit in der Hinsicht da, so kennzeichnet sich das in einer Kreislinie. Andere Kurven sind drei- oder vierlappig usw.

Einen Anhalt für die Abnutzbarkeit ohne Rücksicht auf Richtungsunterschiede gibt das A. Rosiwalsche Schleifverfahren, bei dem ein bestimmtes Schleifpulver bis zur Unwirksamkeit auf einer Fläche des Probekörpers verbraucht wird. Die Gewichtsabnahme wird in Volumverlust als Maß des Abnutzungswiderstandes umgerechnet.

Ganz interessant sind auch Versuche, die Höhe des Rückpralls eines Hammerschlags als Maß für die Härte eines Körpers auszunutzen. Im übrigen sei bezüglich eines H. Hertzschens Verfahrens (der als Härtemaß die Größe des Druckes benutzte, der angewandt werden muß, um eine Linse bis zur Erreichung der Elastizitätsgrenze in eine Platte einzupressen) auf physikalische Lehrbücher verwiesen.

Im Überblick läßt sich nicht verkennen, daß es gerade auf dem Gebiete der sog. Härte an Klarheit der Einsicht noch recht sehr mangelt.

II. Spezifisches Gewicht. Die Gesamterde besitzt das hohe spezifische Gewicht von 5,527. Die zugängigen Sphären weichen sehr wesentlich davon ab. Das Luftpolster unseres Sternes ist ganz außen, wo es wahrscheinlich aus Wasserstoff besteht, sehr zart; dort, wo es am schwersten ist, auf dem Boden der Atmosphäre, erreicht es eine Dichte von $\frac{1}{773}$ des Wassers. Die Hydrosphäre weist, wechselnd mit dem Salzgehalt, im allgemeinen Zahlen von $G = 1,000$ bis $1,028$ auf, und die Lithosphäre hat im Mittel eine Eigenschwere von 2,7. So lag der Schluß nahe, daß im Erdinnern sehr gewichtige Massen ruhen. Am einfachsten wird diese Eigenart der Gliederung unseres Planeten in tiefgelegene schwere, nach außen leichtere Stoffe durch die Annahme von gediegen Eisen als Bestand des gewaltigen Erdkerns gedeutet, der nach außen in erst noch recht schwere, nach der Oberfläche der Kugel zu in leichtere Gesteine übergeht. Die natürlich nicht allzu scharf aufzufassende Grenze mag,

Spez. Gewicht
und Art der
Erdsphären.

nach der Aussage der Erdbebenwellen, welche die Erde durchwandert haben, zu urteilen, bei minus 1500 km liegen. Daß gerade Eisen Hauptmineral des Erdsternes sei, schloß man aus der chemischen Natur der Meteoriten, die vielfach aus Eisen mit kleinem Nickelgehalt bestehen, und aus der Erwägung, daß eine stoffliche Gleichmäßigkeit der Sternsysteme wahrscheinlich ist.

Eine ideale, nicht durch Zufuhr aus der Kernzone nach außen in der Stoffverteilung gestörte Erde würde auf der Erdoberfläche von den schwersten metallischen Massen nichts darbieten, weder Platin ($G = 21,5$), noch Gold ($G = 19,3$) oder Silber ($G = 10,6$), Kupfer ($G = 8,9$) oder Eisen ($G = 7,8$). Die äußere Schale ist die eigentliche Domäne leichter Elemente wie Sauerstoff ($G = 1,1$ gegen Luft), Si ($G = 2,5$ gegen Wasser), Al ($G = 2,6$), Ca ($G = 1,6$), Mg ($G = 1,75$), K ($G = 0,87$), Na ($G = 0,97$), H ($0,07$ gegen Luft). Durch besondere Ereignisse, durch Eruptionen und durch die Nachklänge solcher, durch Thermen nämlich, sind die schweren Stoffe in die äußere Zone geraten. Daß dabei gerade das Eisen verhältnismäßig recht reichlich nach außen gelangt ist, deutet gleichfalls auf einen besonders großen Vorrat an ihm im Erdinnern hin.

Zu den schwersten Mineralien gehören außer natürlichen Metallen Oxyde wie Magnetit ($\text{Fe}_3\text{O}_4, G = 5$), Eisenglanz ($\text{Fe}_2\text{O}_3, G = 5$), Sulfide, z. B. Eisenkies ($\text{FeS}_2, G = 5$); mit spezifischen Gewichten von etwa 2,7—3,2 ausgestattet sind die in riesigen Mengen in der Lithosphäre verbreiteten eisenhaltigen Silikate, wie Augit, Hornblende, Glimmer, Olivin. Das mittlere Steingewicht von etwa 2,7 hat der so weitverbreitete Quarz ($\text{SiO}_2, G = 2,65$), nahe stehen ihm die nicht minder reichlich in der Erdkruste vorhandenen Feldspate, fernerhin Leuzit, Nephelin, der Kalkspat, während weitverbreitete Chloride und Sulfate eine leichte Art haben, so Steinsalz ($G = 2,2$), Kali-Magnesiumsalze und Gips ($G = 2,30$). Doch kommen unter ihnen auch Stoffe mit beträchtlicher Eigenschwere vor, z. B. der Anhydrit ($\text{CaSO}_4, G = 3$) und der Schwerspat ($\text{BaSO}_4, G = 4,5$).

Von den Mineralaggregaten der Natur erweckten hinsichtlich des spezifischen Gewichts die Eruptive besonderes Interesse, die als einst feurig-flüssige Massen den tieferen Zonen der Erdkruste entstammen. Als die leichtesten unter ihnen wurden die Elaeolithsyenite mit einer Eigenschwere von etwa 2,5, als die schwersten Peridotite mit G bis 3,45 befunden. Handelt es sich um glasförmige Erstarrungen, so ist das Gewicht geringer als beim kristallinen Material.

Bezüglich der kristallinen Schiefer haben R. Lepsius, F. Becke und A. Heim auf eine recht bedeutsame Beziehung zwischen Gewicht der Volumeneinheit und Mineralbestand hingewiesen. Bei diesen aller Wahrscheinlichkeit nach unter starker Belastung entstandenen Gesteinen findet sich nach ihnen in den Fällen, daß ein Stoff in zwei Modifikationen erscheinen kann, meist die Abart ein, welche die höhere Eigenschwere besitzt. Mit der Vorstellung, daß bei dem Werdegang dieser metamorphen Gesteine der volumverkleinernde Druck eine wichtige Rolle spielte, steht dies Vorkommen möglichst schwerer Substanzen im Einklang. Die Elemente nehmen in ihnen einen kleineren Raum

Spez. Gew. der Mineralien.

Spez. Gew. der Gesteine.

ein als in spezifisch leichteren, eventuell aus denselben Stoffen und im selben Mengenverhältnis zusammengesetzten Körpern. Allerdings ist mit O. Mügge zu bedenken, daß die Regel doch bedeutsame Ausnahmen hat.

Natürlich ist die bei reiner Substanz sich gleichbleibende Eigenschaft des spezifischen Gewichtes von hoher Bedeutung bei der Kennzeichnung der Kristalle. Eine ganz besondere Wichtigkeit ist der Größe auch als einem der Werte beizumessen, die zur Auffindung des Molekularvolumens (Molekulargewicht durch spezifisches Gewicht) führen. Davon wird weiter unten noch die Rede sein.

Trennung von Mineralgemengen nach dem spez. Gew.

Inbesondere kann hier in der Hinsicht eine ausgezeichnete auf die Verschiedenheit der spezifischen Gewichte gegründete Methode der Trennung von Gesteinskomponenten herangezogen werden. Das Verfahren wurde für petrographische Zwecke auf das beste ausgearbeitet und zwar durch die Nutzbarmachung von Flüssigkeiten, deren bedeutende Schwere durch Verdünnung in weiten Grenzen verändert werden kann. Auf solchen von E. Sonstadt, R. Brauns u. a. vorgeschlagenen Flüssigkeiten, wie konzentrierter Lösung von Kaliumquecksilberjodid ($G = 3,196$), Methylenjodid ($G = 3,32$) und Tetrabromacetylen ($G = 2,95$), schwimmen viele Gesteinsgemengteile. Die spezifisch allerschwersten Bestandteile der pulverigen Probe sinken unter und können durch Ablassen aus dem Trennungsgefäß abgesondert werden. Der Rest wird nun weiter dadurch nach Mineralarten getrennt, daß man durch Zusatz mischfähiger leichterer Flüssigkeiten die schwere Lösung verdünnt und damit ihr spezifisches Gewicht herabsetzt. Ist dies soweit geschehen, daß sie leichter ist als ein vorher auf ihr schwimmender Bestandteil des Gesteinspulvers, so sinkt dieser zu Boden und kann abgeschieden werden. Auf die Weise werden durch Fortsetzung des Verfahrens die verschieden schweren Substanzen voneinander getrennt.

Nebenher kann man bei diesen Gliederungen der Materialien das spezifische Gewicht der Gemengteile bestimmen. Bei allmählicher Verdünnung der schweren Lösung kommt nämlich vor dem Ausfallen für jede Mineralart ein Zeitpunkt, in welchem sie in der Flüssigkeit schwebt; dann haben diese und das Mineral gleiche Eigenschwere. Mit Hilfe einer Westphalschen Wage läßt sich leicht und schnell das spezifische Gewicht der Flüssigkeit und somit auch das der gerade schwebenden Substanz feststellen.

Schlammverfahren.

Daß die Trennung von Pulverbestandteilen mittels des insbesondere bei Bodenuntersuchungen gern angewandten Schlammverfahrens oft nicht eine Trennung nach dem spezifischen Gewichte, also nach der mineralogischen Art der Gemengteile zuwege bringt, daß sich vielmehr dabei andere Umstände stark geltend machen, sei hier besonders betont. Die Transportfähigkeit im Wasserstromen und umgekehrt auch die Schnelligkeit des Absetzens hängt nämlich zwar von der Eigenschwere der Stoffe ab, dabei ist aber auch die Stärke der Reibung der Teilchen am Wasser, also die Größe ihrer Oberfläche, wesentlich. Je bedeutender diese verhältnismäßig ist, um so leichter werden die Teilchen fortgeführt, um so langsamer setzen sie sich. So kann es also kommen, daß

verhältnismäßig schwere, aber dünn blättchenförmige Körper, wie Glimmer, sich leicht abschlämmen lassen, während spezifisch leichtere, aber rundliche Bestandteile, wie Quarz, zurückbleiben.

III. Kristalloptik. Die optische Kristallographie stellt mit ihrer innigen Verknüpfung von Theorie und Praxis wohl das reizvollste Kapitel der Mineralogie dar. Eine Fülle interessanter und dabei das künstlerische Gemüt durch leuchtende Schönheit fesselnder Erscheinungen liegt hier vor. Die Übersicht über dies Gebiet wissenschaftlicher Forschung wird am besten von der Betrachtung des Apparates ausgehen, der vor allem das Handwerkszeug des optisch arbeitenden Mineralogen geworden ist und der von bedeutenden Firmen wie R. Fueß in Steglitz, R. Winkel in Göttingen, E. Leitz in Wetzlar u. a. gebaut wird. Es ist das Polarisationsmikroskop, dessen weite Verwendung in Mineralogie und Petrographie insbesondere Henry Clifton Sorby (1858), Ferdinand Zirkel (1863) und H. Rosenbusch (1876) zu danken ist; ein Umstand von allergrößter Bedeutung für die Entwicklung dieser Wissenschaften. Ja, man kann sagen, das polarisierende Mikroskop ist der Hauptträger der Fortschritte auf diesen Gebieten geworden. Viele Forscher haben sich um die Vervollkommnung des Instrumentes und seiner Nebenapparate bemüht; es seien in der Hinsicht, um nur einige zu nennen, hier G. B. Amici, R. Fueß, C. Klein, A. v. Lasaulx, E. Bertrand, A. Michel Lévy, F. Becke, F. E. Wright und M. Berek erwähnt.

Natürlich ist hier nicht der Ort, Einzelheiten der Apparaturen zu erörtern. Was aber einem Besucher schon bei kurzem Verweilen in der Werkstatt eines in Forschertätigkeit sich ergehenden Mineralogen als besonders charakteristisch entgegentreten würde, sei hier vermerkt. Da ist bedeutungsvoll, daß zur Durchleuchtung der Präparate in sehr häufigen Fällen nicht das Licht des Tages oder einer Lampe benutzt wird, die viele Farben im Gemisch aussendet, sondern einfarbige Belichtung; man erhält sie in der mineralogischen Praxis durch gefärbte Bunsenflammen und in reicher Variation durch Monochromatoren, die aus dem lichtstarken Spektrum der Sonne oder von Bogen-, Quecksilber- oder Nernstlampen engbegrenzte Farbentöne herauschneiden. Ein doppelseitiger, plan-konkaver Spiegel des Mikroskops in Verbindung mit beweglichen Kondensorlinsen sorgt für dem jeweiligen Zweck angepaßte Beleuchtung. Blenden vermögen das Lichtbündel einzuengen. Der geräumige Objektisch ist konzentrisch drehbar, mit Kreisteilung und Marke versehen, um Winkelmessungen vornehmen zu können. Kreuzschlitten als Unterlage für das Objekt ermöglichen systematische Bewegungen, Längenmessung und Fixierung bestimmter Punkte im Präparat. Insbesondere hängt natürlich die Leistungsfähigkeit der Mikroskope von der Güte der Objektive ab, die im Zusammenwirken mit den Kondensoren und dem Okular möglichst lichtstarke, wenig gewölbte, unverzerrte Bilder ohne farbigen Rand liefern sollen. Ausgezeichnete Aplanate und Achromate sowie Apochromate in Verbindung mit Kompensationsokularen und Fluoritsysteme gewähren das jetzt im Einklange mit den E. Abbeschen Forderungen in großer Annäherung an die idealen Verhältnisse. Außer Trockensystemen

werden zur Erhöhung der numerischen Apertur gelegentlich für mineralogische Zwecke auch Tauchobjektive benutzt.

Der drehbare Mikroskopisch bringt die Notwendigkeit von Zentriervorrichtungen am Objektiv mit sich, falls man nicht, wie bei Nachetschen Instrumenten, das Objektiv mit dem Drehtisch fest verbindet; der Wunsch, Winkel messen zu können, bedingt außer der Gradteilung des Tisches ein im Okular ausgespanntes Fadenkreuz. Für Längenbestimmungen dienen Okularmikrometer, meßbare bewegliche Arme des Fadenkreuzes oder bewegliche Objektschlitten. Polarisirtes Licht wird durch ein unter dem Objektisch befindliches Nicol (den Polarisator) hergerichtet. Ein analysierendes Prisma wird zumeist in den Tubus, also unter dem Okular eingeschaltet. Sollen Beobachtungen im konvergenten polarisierten Lichte gemacht werden, so werden Objektive großer Apertur und entsprechende Kondensoren zu Hilfe genommen und entweder, wie A. v. Lasaulx angab, das Okular entfernt oder letzteres nach dem Vorschlage von G. B. Amici und E. Bertrand mit einer weiteren Linse kombiniert. Schließlich ist nach C. Klein auch die Möglichkeit gegeben, um diese praktisch ungemein wichtige Beobachtungsart zu ermöglichen, eine Lupe dem Okular aufzuschalten.

Hilfsapparate
zum Mikroskop.

Mancherlei Hilfsapparate treten beim mikroskopischen Arbeiten nach Bedarf in Tätigkeit. Drehapparate gestatten es, Kristalle in verschiedenen Richtungen zu beobachten, oft unter Anwendung von Umhüllungsflüssigkeiten, die bei einer der des Kristalls ähnlichen Brechbarkeit es mit sich bringen, daß man auch durch nicht plattige Präparate oder durch ganze eckige Kristalle hindurchschauen kann, ohne durch Reflexe im Innern des Untersuchungsobjektes gestört zu sein.

Nicht genug, daß Beobachtungen bei Zimmertemperatur ausgeführt werden, hat man durch geschickte von C. Dölter, A. L. Day, R. Nacken u. a. ausgeführte Konstruktionen von Erhitzungsapparaten die Möglichkeit gegeben, bis zu den hohen Wärmegraden von 1500° hinauf mikroskopische Studien zu machen. Eine Fülle von neuen Beobachtungen sind durch solche Instrumente ermöglicht worden, die teils mit Gasheizung, am besten aber mit elektrischer Erwärmungsvorrichtung versehen werden, und in denen die Temperaturen des Präparats neuerdings meist mit Hilfe von Le Chatelierschen Thermoelementen, in extremen Fällen mittels des Wannerschen Pyrometers abgelesen werden. Umgekehrt gestatten Abkühlungsvorrichtungen, wie sie z. B. von H. E. Boeke und dem Verfasser angegeben wurden, optische Verhältnisse bei niederen Temperaturen zu studieren, die mit Hilfe z. B. von Kohlensäureschnee, flüssiger Luft, flüssigem Sauerstoff oder gar Wasserstoff erreicht werden.

Handelt es sich um die Betrachtung undurchsichtiger Körper, etwa von Meteoreisen, ist also Beobachtung in starkem reflektierten Lichte nötig, so vermitteln dies Illuminatoren; das sind kleine in Hülsen gefaßte und über das Objektiv gesetzte Prismen oder Glasscheiben, die von der Seite Licht empfangen und nach unten auf das Präparat werfen, das, nun hell erleuchtet, auch bei starker Vergrößerung erforscht werden kann. Die üblichen Zeichen- und Photographier-

apparate werden vom Mineralogen und insbesondere vom Petrographen in reichem Maße und mit wachsendem Erfolge benutzt, wie manche Prachtwerke, z. B. das von R. Brauns über die Auswürflinge vom Laacher See zeigen.

Die Mühe der Präparation der Objekte wird dem Forscher im Reiche der Mineralien und Gesteine jetzt meist abgenommen. Eine förmliche Industrie hat sich in der Hinsicht entwickelt, sei es bezüglich der Herstellung orientierter Platten und Prismen oder und zwar ganz besonders in Hinsicht der Anfertigung von Dünnschliffen; die Firmen Voigt und Hochgesang in Göttingen und Dr. F. Krantz in Bonn unterstützen dankenswerter Weise in der Hinsicht die Forscher aller Länder mit jährlich vielen Tausenden von ausgezeichneten Präparaten. Diese Dünnschliffe sind durch grobes und immer feineres Schleifen hergestellte, etwa nur 0,02—0,04 mm dicke Blättchen von Mineralien, Gesteinen oder sonstigem Material, die auf einem gläsernen Objektträger in Canadabalsam eingebettet und meist unter dem Schutz eines zarten Deckgläschens geliefert werden. Zuweilen läßt man das Deckglas fehlen, um das Präparat mit besonderen Flüssigkeiten überziehen zu können oder von oben her mit chemischen Reagentien „mikrochemisch“ zu behandeln, wie es zuerst insbesondere E. Boricky (1877) lehrte. Zur genauen Orientierung von Schliffen oder anzuschleifenden Flächen am Kristall hat man kunstvoll ausgedachte Hilfsapparate gebaut, von denen die E. Wülfingsche Schleifvorrichtung ausgezeichnete Dienste leistet. Es gelingt mit ihr die Genauigkeit der Schlißlage bis auf 1 Minute zu treiben und vollkommen ebene Flächen herzustellen, was insbesondere bei Prismenbeobachtungen von größter Wichtigkeit ist.

Mikroskop-
präparate.

Die Anwendungsfähigkeit des mineralogischen Mikroskops ist eine sehr große. Wie aus obigem hervorgeht, dient es nicht allein als Vergrößerungsapparat, zur Verschärfung des menschlichen Gesichtssinnes beim Blick in die Welt des Kleinen, es ist noch zu manchem anderen guten Zwecke nutzbar. Man kann in seinem Felde Längen und Dicken und insbesondere auch ebene Winkel messen, ja man hat es mit Hilfe von Nebenteilen für das Ausmaß von Neigungswinkeln der Kristallflächen geeignet gemacht. Ziemlich schnell läßt sich ferner mit Hilfe einer Zeichnung oder eines Photogramms das Mengenverhältnis der Bestandteile eines mikroskopischen Präparates feststellen. Man benutzt dabei eine recht lange zickzackförmige oder beliebig sonst über das Bild gezogene Indikatrix genannte Linie und mißt die Anteile aus, welche die gleichartigen Gemengteile an ihr haben. Das Verhältnis der einem Bestandteil zugehörigen Indikatrixlänge zur Länge der ganzen Linie beziffert seine volumetrische Beteiligung. Die Sicherheit wächst mit der Länge der Leitlinie. Besondere Okulare mit Koordinatenteilung ermöglichen es, gleich das Bild im Mikroskop zum Ausmessen heranzuziehen.

Verwendung des
mineralogischen
Mikroskops.

Wie noch gezeigt werden soll, ist das Mikroskop zugleich Refraktometer, d. h. es dient zur Bestimmung von Brechungsexponenten, und eine ganz neue Welt tut sich auf, wenn es als Polarisationsinstrument benutzt wird.

Optische Untersuchungen. Bei den optischen Studien der Mineralogen handelt es sich im wesentlichen um folgende Feststellungen.

Brechung.

Eine Konstante für jede Substanz ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in ihr. Sie wird bekanntermaßen in ihrem Verhältnis zur Geschwindigkeit im leeren Raum als reziproker Wert durch den Brechungsexponenten n ausgedrückt. Im allgemeinen ist die Schnelle des Lichtes bei Mineralien kleiner als im Vakuum, bei manchen Metallen eigenartigerweise z. T. aber bedeutend größer, wie die Brechungsexponenten z. B. von Gold, Silber und Kupfer = 0,6; 0,3 und 0,5 für gelbes Licht zeigen. Verhältnismäßig sehr langsam pflanzt sich das Licht im Diamanten, Rotkupfererz und Zinnober fort; die Brechungsexponenten für Rot betragen für diese Stoffe etwa 2,45; 2,85 bis 3,2. n wechselt im Übrigen bekanntermaßen mit der Farbe des benutzten Lichtes. Es muß also bei genaueren Bestimmungen monochromatisch sein. Vielfach genügt zur Unterscheidung einer Substanz von einer anderen aber schon ein runder Wert. Man ermittelt ihn in der mineralogischen Praxis jetzt recht oft durch Einbettung der zu beurteilenden Probe in Flüssigkeiten bekannter Brechbarkeit n' . Ist $n = n'$, so werden Umrandung und Oberfläche des eingebetteten Minerals nicht zu sehen sein, so wenig wie man den Rand eines Wassertropfens, der in Wasser gefallen ist, bemerkt. Um zu beurteilen, ob $n >$ oder $< n'$ ist, benutzt man einen Lichtschein an der Grenze der Probe, die sog. Beckesche Linie. Sie wandert beim Heben des Mikroskoptubus in das stärker brechende Medium, eine sehr oft mit großem Vorteil ausnutzbare Erscheinung, die sich dadurch erklärt, daß zufolge Reflexion an der Grenze der beiden Stoffe derjenige mit stärkerer Brechung, in welchem ja viel Licht totalreflektiert wird, durch Lichtreichtum ausgezeichnet sein muß. Eine feinere Ausarbeitung mittels schräger Beleuchtung hat diese Einbettungsmethode insbesondere durch J. L. C. Schroeder van der Kolk erfahren.

Natürlich wird von den Mineralogen auch vielfach die bekannte genaueste Werte liefernde Prismenmethode verwandt, die fast allein in Betracht kommt, wenn die Veränderung der Brechungsexponenten mit der Temperatur studiert werden soll. Eingehende Untersuchungen über die Theorie und Handhabung dieser Arbeitsweise bei den verschiedenen optischen Gruppen der Kristalle auch im Falle beliebiger Orientierung der Präparate verdankt man insbesondere Th. Liebisch.

Doppelbrechung.

Die fundamentalen Verhältnisse der doppelten Brechung, die Erasmus Bartholin (1669) am Kalkspat entdeckte, wurden bereits 1678 von Chr. Huygens dargelegt. E. L. Malus, F. Arago, J. B. Biot und D. Brewster erwarben sich zu Anfang des vorigen Jahrhunderts besondere Verdienste durch viele einschlägige Beobachtungen und A. Fresnel (1788—1830) sowie F. E. Neumann (1834), A. Bertin (1861), E. Lommel (1883) durch die exakte Erklärung der mannigfachen Erscheinungen. Es seien von solchen im folgenden die für die mineralogische Praxis wichtigsten in allereinfachster Darstellung auf der Grundlage einiger allgemeiner Betrachtungen auseinandergesetzt.

Optische Gruppen.

Die Mannigfaltigkeit der Kristalle in geometrischer Hinsicht ist durch die hohe Zahl von 32 Klassen verschiedener Symmetrie gekennzeichnet. Weit weniger Abteilungen hat man in optischer Hinsicht gefunden, nämlich nur

fünf. (Dabei ist von der Sonderstellung zirkulärpolarisierender Substanzen abgesehen.) Es sind die folgenden: I. Optisch isotrope Kristalle. Isometrische Gruppe. Sie stimmen im Verhalten gegen das Licht mit den amorphen Stoffen überein und zeigen keine optischen Richtungsverschiedenheiten. Ihr optisches Sinnbild ist also eine Kugel, die ja Gleichmäßigkeit auf allen Geraden vom Mittelpunkt aus gerechnet aufweist. II. Optisch anisotrope Kristalle. 1. Optisch einachsige Gruppe: trigonale, tetragonale und hexagonale Kristalle. Ihr optisches Symbol ist ein Rotationsellipsoid, dessen Drehachse mit der kristallographischen Hauptachse zusammenfällt. Sie ist Richtung der optischen Achse, d. h. der Isotropie; in allen anderen Richtungen herrscht Doppelbrechung. 2. Optisch zweiachsige Gruppe. Die Glieder dieser Abteilung besitzen zwei optische Achsen. a) orthotrimetrische Kristalle mit drei senkrecht zueinander stehenden optischen Symmetrieebenen. Ihr optisches Symbol ist ein dreiachsiges Ellipsoid, dessen drei Achsen mit den kristallographischen Richtungen a, b und c für jede Farbe zusammenfallen; b) monokline Kristalle mit einer optischen Symmetrieebene. Optisches Symbol ist bei ihnen ein dreiachsiges Ellipsoid, mit einer Achse in der kristallographischen Richtung b für jede Farbe. Die beiden anderen Achsen des Ellipsoids liegen für die verschiedenen Lichtsorten beliebig in der zu b senkrechten Ebene; c) trikline Kristalle. Ohne optische Symmetrieebene. Optisches Symbol ist ein schief und für jede Farbe anders liegendes dreiachsiges Ellipsoid.

Von hohem Interesse ist es natürlich, geometrische und optische Symmetrie zu vergleichen; in der Hinsicht liegen die Verhältnisse folgendermaßen: im triklinen, monoklinen und orthotrimetrischen Kristallsystem bekundet sich die optische Bauart ganz wie die geometrische der höchsten, d. h. holoedrischen Klasse. Bei den Systemen mit Wirtelbau übersteigt aber die optische Symmetrie die geometrisch-vollflächige, denn findet man bei letzterer außer der etwaigen horizontalen Symmetrieebene noch 3, 4 oder 6 vertikale in rhythmischer Folge, so ist optisch ein trigonaler, tetragonaler oder hexagonaler Kristall entsprechend seinem optischen Symbol, dem Rotationsellipsoid, nicht weniger als $1 + \infty$ mal symmetrisch. Die rhythmische Wiederholung ist ins Unendliche gestiegen. Noch höher über den geometrischen erhebt sich der optische Symmetriegrad isometrischer Gebilde. Haben sie im höchsten (holoedrischen) Falle 9 geometrische Symmetrieebenen, so sind es optisch stets gewissermaßen $\infty \cdot \infty$, insofern man durch jeden der unendlich vielen Kugeldurchmesser des optischen Symbols unendlich viele Symmetrieebenen legen kann.

Diese Symmetriegesetze beherrschen alle optischen Eigentümlichkeiten der verschiedenen Gruppen in so einfacher Weise, daß man sich bei ihrer Kenntnis im allgemeinen das Verhalten der Kristalle sehr leicht ableiten kann, wie es im folgenden gezeigt werden soll.

Eine besonders anschauliche Vorstellung über die Lichtbewegung in Kristallen geben gewisse Schemata, welche die Größe der Brechungsexponenten für Schwingungen wechselnder Richtung kennzeichnen oder auch unmittelbar die Geschwindigkeit der Lichtstrahlen versinnbildlichen.

Schemata der
Kristalloptik.

Die Verhältnisse bei isotropen Stoffen mit ihrer Gleichmäßigkeit der Brechung bzw. Lichtgeschwindigkeit in allen Richtungen brauchen hier nicht näher erwähnt zu werden. Fig. 29 a, b beziehen sich auf optisch einachsige Kristalle. Schwingungen parallel der vertikalen Achse geben entweder den größten Brechungsexponenten γ (Fig. 29a) oder den kleinsten α (Fig. 29b). Danach unterscheidet man in dieser Abteilung seit J. B. Biot und A. Fresnel positive und negative Doppelbrechung. Bei zweiachsigen Kristallen bekunden sich, wie A. Fresnel nachwies, drei ausgesprochene, senkrecht aufeinander stehende Richtungen; ihnen parallel schwingende Strahlen liefern den größten Brechungsexponenten γ , den mittleren β und den kleinsten α . (Fig. 29 c, d.) Zwischen α und γ

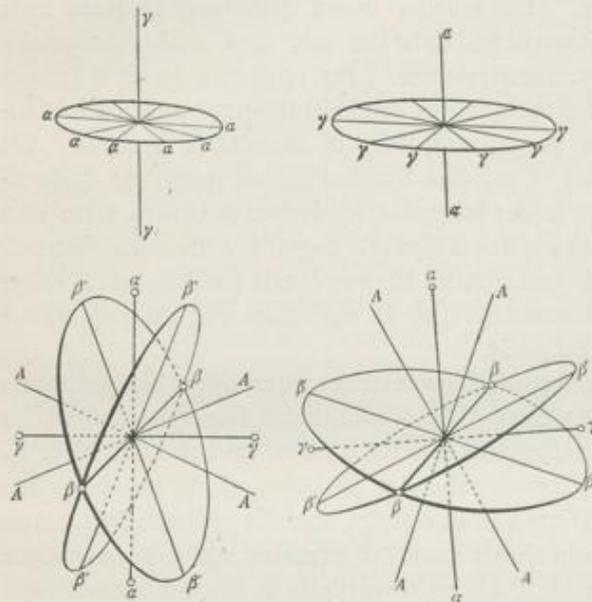


Fig. 29 a, b, c, d. Erläuterung des optischen Wesens doppelbrechender Kristalle.

gelegen muß es natürlich in der Ebene $\alpha\gamma$ vier Richtungen β' geben, denen parallel schwingend Lichtstrahlen gleichfalls den Brechungsexponenten β besitzen. So kann man denn durch diese Richtungen β' und die Achse β einen Kreis legen, dessen Radien die Größe β haben. Strahlen mithin, die senkrecht zu diesen beiden Kreisebenen sich fortpflanzen, werden nicht in zwei verschieden geschwinde Bewegungen zerfallen, wie es sonst im Kristall statthat. Diese beiden ausgezeichneten Normalen auf die Kreisschnitte in der Ebene von α und γ nennt man die optischen

Achsen oder Binormalen. Auch hier tritt der Dualismus von positiv und negativ doppelbrechenden Kristallen heraus; bei ersteren Fig. 29c ist die Halbierungslinie des spitzen Winkels der optischen Achsen, die sog. 1. Mittellinie, γ , bei letzteren (Fig. 29d) α . Die Teilung des stumpfen Winkels der optischen Achsen führt zur zweiten Mittellinie. Senkrecht zur Ebene $\alpha\gamma$ der optischen Achsen verläuft die optische Normale β .

Strahlengeschwindigkeitsflächen.

Vielleicht noch anschaulicher als das Schema der Fig. 29 sind die bei mineralogischen Betrachtungen oft verwandten sog. Strahlengeschwindigkeitsflächen. Sie stellen in sehr einfacher Weise vor, wie weit Lichtstrahlen in einem Medium nach einer bestimmten Zeit gelangen. Bei isotropen Körpern ergibt sich in der Hinsicht eine Kugel, zum Zeichen, daß vom Mittelpunkte aus das Licht nach allen Seiten gleich schnell sich fortpflanzt. Anders bei den optisch einachsigen Körpern. Für sie gilt nach allen zuverlässigen Präzisionsunter-

suchungen in der Tat die Vorstellung, die schon Chr. Huygens 1678 bei seinen berühmten Darlegungen über die Doppelbrechung des Kalkspates in genialer Voraussicht als die wahrscheinlichste betrachtete. Die Strahlengeschwindigkeitsfläche setzt sich bei ihnen zusammen aus einer Kugel für die ordentlichen Strahlen und einem Umdrehungsellipsoid, das an dem Ende der Achse c die Kugel tangiert für die außerordentlichen.

Die Richtung der geometrischen Hauptachse dieser Kristallgruppe kennzeichnet sich somit als solche einfacher Brechung, im übrigen pflanzen sich in den betreffenden Stoffen jeweils zwei Lichtbewegungen verschieden geschwind in jeder Richtung fort. Das bringen die Figuren 30a u. b zum Ausdruck. In

ihnen ist die Vertikale die Richtung der Isotropie. Dabei ist die eine Lichtbewegung, die ordentliche o , stets gleich schnell, die andere, die außerordentliche e verschieden geschwind in den wechselnden Richtungen. Läßt man die Durchschnitte um die Vertikale rotieren, so erhält man das Gesamtschema: in Fig. 30a eine Kugel mit innerem verlängerten Rotationsellipsoid, in Fig. 30b ein zusammengedrücktes Umdrehungsellipsoid mit einer Kugel im Innern. Es sind die Fälle positiver und negativer Doppelbrechung.

Bei den zweiachsigen Kristallen ist die Strahlengeschwindigkeitsfläche entsprechend den grundlegenden Darlegungen A. Fresnels weit verwickelter.

Fig. 30c, stellt sie vor. Besonders eigenartig ist die Durchdringung der beiden Lichtbewegungen der γa — Ebene in vier Punkten, in welchen die sog. sekundären optischen Achsen münden. Die schon erwähnten primären optischen Achsen sind die Lote auf die Tangentialebenen an die beiden sich in den vier Punkten schneidenden Flächen.

Höchst anschaulich tritt in den Strahlengeschwindigkeitsflächen der gesetzmäßige Wechsel der Doppelbrechung mit der Richtung heraus. So zeigen Fig. 30a und b unmittelbar, daß die Differenz der Geschwindigkeiten für Strahlen in der Richtung der geometrischen Achse $c = 0$ ist und daß sie im allmählichen Übergange ihr Maximum in allen Linien senkrecht c erreicht. Beachtenswert ist bei solcher Beurteilung der Schnelligkeit des Lichtes nach verschiedenen

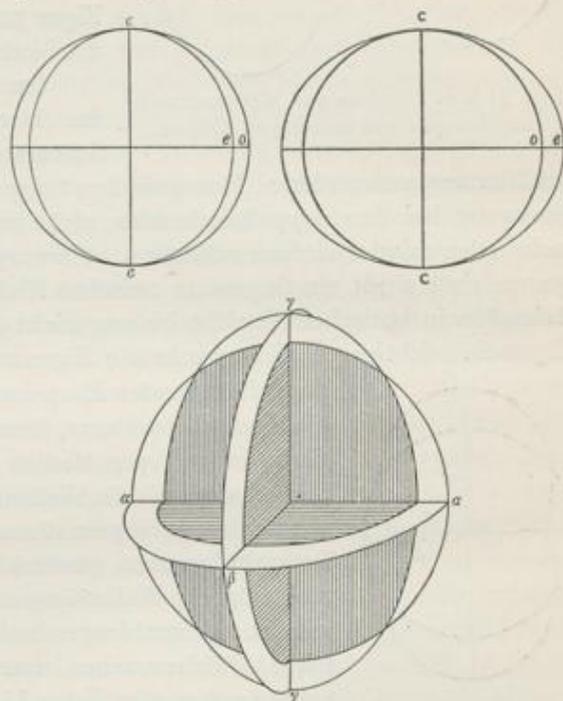


Fig. 30a, b, c, Strahlengeschwindigkeitsflächen doppelbrechender Kristalle.

Richtungen kristallisierter Materie, daß im allgemeinen die Geschwindigkeit der Strahlen mit der ebener Wellen nicht zusammenfällt. Zutreffend ist es zwar in jeder Richtung isotroper Körper, wie die Fig. 31a zeigt. Die ebene Wellenfläche ist in gewisser Zeit bis WW, also um v (gemessen auf der Wellennormale)

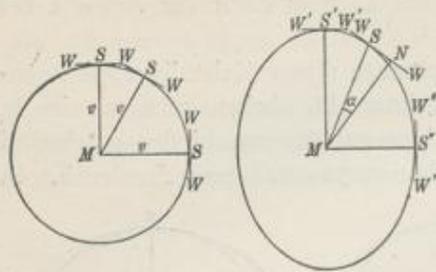


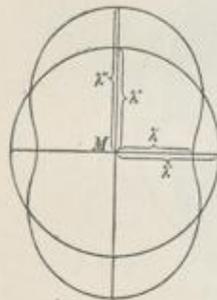
Fig. 31 a, b. Strahlen und Wellennormalen bei isotropen und anisotropen Körpern.

vorangeschritten und dasselbe Maß der Geschwindigkeit gilt für den Lichtstrahl MS. Nicht aber ist das der Fall in Fig. 31 b, in welcher Lichtstrahl MS und Wellennormale MN einen Winkel α miteinander machen. In besonderen Lagen, so bei der Figur 31 b bezüglich MS' und MS'' tritt das Verhältnis der Fig. 31 a wieder ein.

Im übrigen kann hier füglich von der Herleitung der oben angeführten Schemata, gleichwie von der näheren

Schilderung noch anderer „Bezugsflächen“ abgesehen werden, welche die Lichtbewegung bei den doppelbrechenden nicht zirkularpolarisierenden Kristallen mehr oder minder einfach erläutern. Hervorgehoben sei, daß sie alle zentrosymmetrisch sind; ein Gegensatz zwischen Richtung und Gegenrichtung ist bei Kristallen in optischer Hinsicht bislang nicht gefunden. Sei hier nur noch als allgemein wichtiger Gesichtspunkt die Eigenart des Maßes der Wellenlänge in

doppelbrechenden Körpern herausgehoben. Sie hat in ihnen die Konstanz verloren, durch welche sie für jede bestimmte Farbe in isotropen Medien auszeichnet ist. In anisotropen Stoffen wechselt die Wellenlänge λ nicht nur mit der Farbe, sondern auch, soweit die außerordentlichen Lichtwellen in Betracht kommen, gesetzmäßig mit der Richtung. So ist es also möglich, Wellenlängenflächen zu konstruieren, ähnlich wie oben Strahlengeschwindigkeitsflächen erörtert sind. Diese λ -Flächen stehen letzteren ziemlich nahe, doch haben sie bei der außerordentlichen Lichtbewegung optisch einachsiger Körper nicht die Gestalt eines Rotationsellipsoids, sondern eines entsprechend gelegenen Ovaloides. Die höchst eigenartige Veränderlichkeit der Wellenlänge in einer Hauptebene eines optisch zweiachsigen Kristalls gibt Fig. 32 wieder.



λ -Flächen.

Fig. 32. Ein Hauptschnitt der Wellenlängenfläche bei optisch zweiachsigen Körpern.

Unterscheidung isotroper und anisotroper Körper.

Wenden wir uns nunmehr der kristallographisch optischen Praxis zu, so erhebt sich vor allem die Frage, wie isotrope Stoffe von anisotropen zu unterscheiden sind.

Die ungemein wichtige Untersuchung, ob der eine oder andere Fall vorliegt, wird beim Arbeiten mit dem mineralogischen Mikroskop durch den Gedanken geleitet, daß es gelingen wird, die beiden durch Doppelbrechung entstandenen Lichtbewegungen zur Interferenz zu bringen und daran den Fall der Anisotropie zu erkennen. Der Gang auf diesem ganz richtigen Wege wird nun dadurch zu einem sehr bequemen, daß man linear polarisiertes Licht be-

Linear polarisiertes Licht.

nutzt. Es ist das, wie E. L. Malus (1810) erkannte, im Gegensatz zum gewöhnlichen Lichte eine sehr einfache Art, bei der nämlich die Ätherschwingungen ständig in nur einer Ebene erfolgen. Man kann sie sich durch Reflexion des Lichtes an mancherlei Medien, auch durch Brechung oder am besten mittels Nicolscher Prismen herstellen; letztere sind Kalkspatpräparate, in welchen der eine von den beiden durch Doppelbrechung entstandenen Lichtstrahlen durch Totalreflexion an einer Zwischenschicht von Canadabalsam entfernt wird. Der andere zur Verfügung bleibende ist für alle Farben vollkommen linear polarisiert, gleichwie, beiläufig gesagt, auch der zur Seite geworfene. Gewöhnliches Licht, das durch ein Nicolsches Prisma geht, wird zu linear polarisiertem. Man kann sich daher einen solchen Polarisator vorstellen wie ein Gitter für Lichtschwingungen; es läßt nur Schwingungen einer Ebene NN hindurch. Somit ist es ganz verständlich, daß zwei Nicols parallel (d. h. mit gleichgerichtetem NN) hintereinandergestellt Licht passieren lassen, aber nicht wenn sie zueinander gekreuzt stehen, denn das vom ersten Nicol kommende, parallel NN schwingende Licht stößt mit senkrecht zu NN des zweiten Nicols gerichteten Schwingungen auf ihn; es wird „ausgelöscht“. In dem dunklen Gesichtsfelde der gekreuzten Nicols (des Polarisators und des Analysators) werden üblicherweise die Präparate studiert.

Sehr bald schon nach Entdeckung der grundlegenden Verhältnisse spaltete sich die Methode der Untersuchung im polarisierten Lichte in zwei Weisen, die man heute gern die orthoskopische und die konoskopische nennt. Orthoskopie lehrt die optische Art des zu untersuchenden Objektes in Richtung der Mikroskopachse kennen, während die Konoskopie alle Richtungen auf einmal kennzeichnet, die innerhalb eines bestimmten Lichtkegels sich befinden. Die noch oft verwendeten Ausdrücke Untersuchung im parallelen sowie im konvergenten polarisierten Lichte sollen das nämliche besagen. In der Art des vom beobachtenden Auge aufgenommenen Bildes sind die beiden Methoden sehr verschieden, insofern beim Orthoskopieren das Präparat selbst wahrgenommen wird, beim Konoskopieren indes die von ihm veranlaßte Interferenzfigur.

Orthoskopische Methoden. Wie E. L. Malus fand, ist es ein Charakteristikum für isotrope Stoffe, daß sie an der Schwingungsebene in sie eindringenden linear polarisierten Lichtes nichts ändern. Somit bewirken sie im orthoskopischen dunklen Gesichtsfelde der gekreuzten Nicols keine Störung. Das Gesichtsfeld bleibt dunkel; Lagenveränderungen des isotropen Mediums machen nichts aus.

Anders die anisotropen Substanzen. Eine doppelbrechende Platte möge man sich vorstellen wie ein Doppelgitter für Lichtschwingungen und zwar mit aufeinander senkrechten Gitterrichtungen RR und SS. Fällt linear polarisiertes Licht derart auf sie, daß seine Schwingungsrichtung parallel RR oder SS verläuft, so erhält es ungehinderten Durchpaß und es wird dann vom Analysator, der zum Polarisator gekreuzt steht, vernichtet. Nicht so in den Zwischenstellungen, wie Fig. 33 eine erläutern möge. NN ist die Schwingungsebene des vom Polarisator kommenden Lichtes. In der doppelbrechenden Platte, deren „Haupt-

Orthoskopische
und konosko-
pische Unter-
suchung.

Verhalten iso-
troper Körper
zwischen ge-
kreuzten Nicols.

Verhalten ani-
sotroper Körper
zwischen ge-
kreuzten Nicols.

schwingungsrichtungen“ parallel RR und SS verlaufen, die also keinen unmittelbaren Durchlaß gewährt, findet eine Zerlegung von NN in r und s statt. So pflanzen sich denn in dem anisotropen Körper zwei Wellenbewegungen fort; sie haben verschiedene Geschwindigkeiten, weisen also bei ihrem Austritt eine Wegdifferenz auf und gelangen, sie in Luft beibehaltend, zum Analysator,

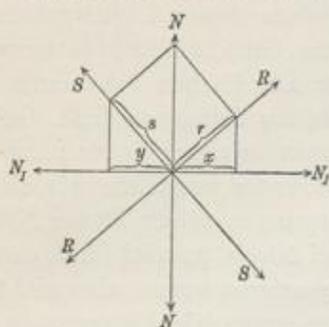


Fig. 33. Erläuterung der Interferenz in einer doppelbrechenden Platte zwischen gekreuzten Nicols.

Abhängigkeit des Polarisationsstones von der Stärke der Doppelbrechung und der Plattendicke.

Keilwirkung.

Natürlich muß die Art des Polarisationsstones, der ja ein Ausdruck für die Wegdifferenz ist, welche das Licht in seinen Schwingungen r und s in der doppelbrechenden Substanz erhalten hat, abhängig sein einmal von der spezifischen Art der Platte und weiter von ihrer Dicke d. Je größer letztere, desto größer ist die Wegdifferenz, welche die beiden verschieden geschwinden Lichtbewegungen r und s erfahren. So ist man zu der einfachen Gleichung $\Delta = (n_2 - n_1)d$ gelangt, in der Δ die erwähnte Wegdifferenz, $n_2 - n_1$ die Stärke der Doppelbrechung, durch die Differenz der Brechungsexponenten ausgedrückt, und d die Plattendicke bedeutet.

Um diese Verhältnisse in allen Abstufungen verfolgen zu können, benutzt man in der mineralogischen Praxis wohl einen Keil, der aus doppelbrechendem Material gefertigt ist; er hat als solcher verschiedene von der Schneide aus zunehmende Dicke. Die Größe $n_2 - n_1$ ist bei ihm natürlich überall gleich. So hängt denn Δ , und mit ihm die Polarisationsfarbe, nur von d ab. Beleuchtet man mit monochromatischem Lichte z. B. Rot, so erkennt man zwischen gekreuzten Nicols dunkle und rote Streifen. Die dunklen zeigen Vernichtung an, die hellen Verstärkung. Wo Auslöschung für Rot statthat, wird sie für Grün nicht gegeben sein. Benutzt man also zugleich rotes und grünes Licht, so werden rote und grüne Streifen wechseln; wo es hell für Rot ist, ist es dunkel für Grün und umgekehrt. Bei Tageslicht kommen alle Newtonschen Farben in regelmäßiger Weise zur Geltung: man beobachtet das wunderschöne Bild von ineinander verfließenden Bändern, deren Folge sich nach der Wiederkehr bestimmter Farben in solche 1., 2., 3., 4. usw. Ordnung teilt.

Es ist hiernach ohne weiteres verständlich, daß die Doppelbrechung $(n_2 - n_1)$ einer Platte unter Ausnutzung des Polarisationsstones und der Präparatdicke erschlossen werden kann. Der Interferenzfarbe entspricht ja eine bestimmte aus

Tabellen zu entnehmende Wegdifferenz Δ , die Plattenstärke wird am besten mittels Sphärometers erschlossen. Sehr praktisch sind für die wichtige Messung der Doppelbrechung sog. Kompensatoren nach Art des von J. Babinet angegebenen. Es handelt sich dabei um zwei zueinander bewegliche Quarzkeile, die mit ihren c-Achsen um 90° verwendet übereinander liegen; wo sie gleiche Dicke haben, findet optische Kompensation statt, die sich zwischen gekreuzten Nicols durch einen dunklen Streifen geltend macht. Die Einschaltung einer doppelbrechenden Platte verschiebt dieses Interferenzband um eine auszumessende Strecke; ihr Betrag ist ein Anhalt für die Wegdifferenz Δ . Bei bekannter Plattendicke ist es leicht, die Doppelbrechung des gesuchten Präparats nach der oben erwähnten einfachen Gleichung unter Berücksichtigung einer Kompensatorkonstanten zu ermitteln.

Natürlich wird auch die bekannte Prismenmethode angewandt, um die Hauptbrechungsexponenten und damit ihre Differenz, also den Grad der Doppelbrechung festzustellen.

Für die Beobachtung der Anisotropie undurchsichtiger Stoffe gab J. Königsberger eine einfache Vorrichtung an, mit der man das Vorhandensein zweier ungleicher Schwingungen im senkrecht zur Platte reflektierten Lichte nachweist.

Die zwischen gekreuzten Nicols herrschende Dunkelheit im Gesichtsfelde des Mikroskops wird durch eine doppelbrechende Platte nicht gestört, wenn ihre Hauptschwingungen RR und SS, die ja gewissermaßen glatte Wege für das Licht darstellen, mit den Schwingungsrichtungen des Nicols NN und N_1N_1 zusammenfallen. Bei Abweichung aus dieser Lage hellt die Platte auf. So ist es denn leicht, bei bekannter Lage von NN und N_1N_1 die Lage von RR und SS, des sog. Auslöschungskreuzes, festzustellen. Man bringt das Präparat in Dunkellage. Das NN und N_1N_1 parallel gespannte Fadenkreuz im Okular, das man gleichzeitig mit dem Präparat sieht, projiziert dann ohne weiteres RR und SS auf die Platte. Bilden diese Richtungen mit einer kristallographisch herausgehobenen Kante einen von 0° bzw. 90° abweichenden Winkel, so spricht man von einer Schiefe der Auslöschung zur Kante, deren Winkel α man mit Hilfe der Kreisteilung am Objektisch ausmessen kann.

Ersichtlich ist durch diese Beobachtung ein sehr wertvolles Kennzeichen gewonnen, ein Zahlenwert, der für die betreffende Substanz charakteristisch ist.

Die Wichtigkeit dieser Größe α macht es verständlich, daß man ganz besonders darauf Bedacht genommen hat, sie möglichst genau zu bestimmen. Dazu dienen z. B. grelle Beleuchtung, die auch geringe Abweichung von der Dunkelstellung noch erkennen läßt, das sog. Bertrandsche Doppelquarzokular, der Macé de Lépinaysche Doppelquarzkeil, die Wrightsche Doppelkeilplatte u. a., die hier nur als Zeichen für die Mannigfaltigkeit des einschlägigen mineralogischen Instrumentariums angeführt, aber nicht erläutert werden sollen.

Schon aus der Überlegung von S. 602 geht hervor, worauf nochmals beiläufig hingewiesen sei, daß die Arme des Auslöschungskreuzes nicht gleichwertig sind; der eine, er sei gg genannt, entspricht der Schwingungsebene einer

Kompensatoren.

Prismen.

Doppelbrechung
undurchsichtiger
Körper.Auslöschungs-
richtungen.Unterscheidung
der langsamen
und schnellen
Welle.

schnellen, der andere, *kk*, der einer langsamen Lichtbewegung. So ist es also möglich, eine doppelbrechende Platte nicht nur bezüglich der Schiefe des Auslöschungskreuzes zu einer Kante zu kennzeichnen, sondern auch noch dazu anzugeben, ob *RR* oder *SS* die Richtung *gg* oder *kk* ist. Diese wichtige Untersuchung wird in der mineralogischen Praxis mit Hilfe eines in seiner Orientierung bezüglich *gg* und *kk* bekannten Präparats, meist eines Gipsblättchens vom Rot 1. Ordnung oder eines doppelbrechenden Keils, ausgeübt und zwar auf Grund der Überlegung, daß bei einer Parallellagerung von *kk* und *gg* der zu untersuchenden Platte mit *kk* und *gg* des Hilfspräparates eine höhere Polarisationsfarbe eintreten muß als in der Lage, bei welcher *kk* der Platte parallel *gg* des Gipsblättchens oder des Keils verläuft.

Kennzeichnung
von optischen
Gruppen durch
die Lage der
Auslöschungs-
kreuze.

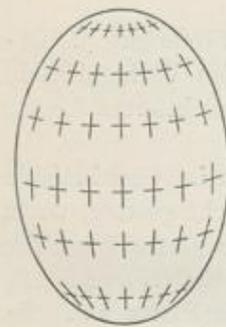


Fig. 34. Lage der Auslöschungsrichtungen auf dem Symbol eines optisch einachsigen Kristalls.

Auf Grund der Beobachtungen über die Lage der Auslöschungsrichtungen läßt sich nun leicht die Zugehörigkeit eines Stoffes zu einer oder anderen der optischen Gruppen ermessen. Natürlich kommen hier nur anisotrope Körper in Betracht. Bei ihnen ist die Lage des Auslöschungskreuzes unmittelbar durch die optische Symmetrie gegeben, bei den optisch einachsigen zunächst also durch die eines Rotationsellipsoides mit Achse *c* als Drehachse. Beliebige kleine Flächenteile kann man als eben denken; die Spur der Symmetrieebenen des Ellipsoides zeichnen auf ihnen alsbald die Lage der Auslöschungen (Fig. 34). Dabei ist charakteristisch, daß jeweils der im Schnitt durch Achse *c* schwingende Strahl der außerordentliche *e*, der dazu senkrecht schwingende der ordentliche *o* ist. Bei orthotrimetrischen, monoklinen und triklinen Kristallen kann man sich durch den Gesichtspunkt leiten lassen, daß geometrische Symmetrie der Holoedrie und optische Symmetrie bei ihnen gleich sind. So ist es ganz ohne weiteres ersichtlich, daß z. B. im monoklinen System die Auslöschungskreuze stets symmetrisch zum Schnitt durch die Achsen *a* und *c* liegen müssen. Die speziellen Werte der im allgemeinen variablen Schiefen wechseln von Substanz zu Substanz. So wurde die Neigung der Auslöschungsrichtung *gg* zur Achse *a* auf der seitlichen Fläche z. B. beim Orthoklas = 5° , beim Augit die von *kk* zur Achse *c* = 42° befunden.

Universalme-
thode.

All diese Überlegungen können für die Untersuchung der Kristalle insbesondere mit Hilfe von Drehapparaten noch intensiver nutzbar gemacht werden, wie es besonders E. v. Fedorow und F. E. Wright gezeigt haben. Es gelingt in der Tat mit Hilfe nur einer Platte, die auf drehbaren Universalstischen in wechselnden Richtungen untersucht wird, alle optischen Konstanten des betreffenden Stoffes, wenn auch nur in Annäherung, zu ergründen.

Pleochroismus.

Wie bereits im einleitenden Kapitel S. 535 mitgeteilt ist, bringt es der Wechsel der optischen Eigenschaften mit der Richtung bei bestimmten Kristallgruppen mit sich, daß die Farbe bei der Durchsicht durch einen Kristall in oft überraschend drastischer Art bei seiner Drehung wechselt; so erscheint der

monokline Epidot parallel der Achse c durchschaut grün, senkrecht dazu braun. Beim orthotrimetrischen Cordierit wechselt dieser Richtungspleochroismus nach den drei kristallographischen Achsen in blau, grüngelb und indigoblau.

Die Verteilung der Farbentönung nach der Richtung wird durch die Symmetrie der optischen Gruppe bedingt. Natürlich ist eine Verschiedenheit der Absorption mit der Richtung bei isometrischen Kristallen nicht denkbar.

Nun kommt aber noch hinzu, daß sich Farbenverschiedenheiten auch auf derselben Fläche je nach der Schwingungsrichtung zeigen, d. h. die beiden durch Doppelbrechung entstandenen Lichtstrahlen können verschieden gefärbt sein, etwa grün und braun, gelb und rot. Man erkennt das mit Hilfe eines Nicols, durch das man erst die eine, dann die andere Lichtschwingung beobachtet.

Die grundlegenden Untersuchungen über Pleochroismus sind insbesondere D. Brewster (1817), W. Haidinger (1845 und später) sowie W. Voigt (1884) zu verdanken.

Eine der für die allgemeine Auffassung der Kristallstruktur wichtigsten optischen Eigenschaften ist schließlich die Zirkularpolarisation.

Klassisch durch die Untersuchungen von F. Arago (1811), J. B. Biot (1812), J. Herschel (1821) und A. Fresnel (1822) ist in der Hinsicht der Quarz. Eine Platte parallel der Basis dieses trigonalen Minerals dreht die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht, das sie durchsetzt. Schwingt in Fig. 35 das ankommende (einfarbige) Licht parallel NN , so verläßt es das Mineral mit Schwingungen parallel $N'N'$; α ist der Drehwinkel. Für Quarz z. B. beträgt er im Natriumlicht $21,72^\circ$ bei einer 1 mm dicken Platte. Ein Analysator N_1N_1 , der zum Polarisator gekreuzt steht, muß also im Natriumlicht um $21,72^\circ$ verstellt werden, um bei eingeschobener Quarzplatte wieder Dunkelheit des Gesichtsfeldes hervorzurufen. α wächst proportional der Plattendicke; somit würde eine 2 mm dicke Quarzplatte die Schwingungsebene von Na-Licht $43,44^\circ$ und ein 1,64 cm starkes Präparat um 360° drehen. Dazu kommt als wesentliches Moment, daß α mit der Lichtsorte sehr stark wechselt (Fig. 36); so ist der Wert für Linie D beim erwähnten Versuch = $21,72^\circ$, für Linie F aber = $32,50^\circ$. Bei Tageslicht stellt mithin eine Lagenveränderung des Analysators keine Dunkelheit her. Die Quarzplatte erscheint stets farbig. Schließlich wird die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen dadurch erhöht, daß die Quarzkristalle die Ebene des linear polarisierten Lichtes zum Teil nach rechts drehen (Rechtsquarze), zum Teil nach links (Linksquarze) in Übereinstimmung mit ihrem zwiefachen geometrischen Bau.

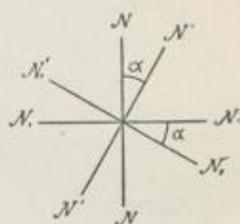


Fig. 35. Drehung der Schwingungsebene monochromatischen linear polarisierten Lichtes beim Durchgang durch eine zirkularpolarisierende Platte.

Zirkularpolarisation.

Schwingt in Fig. 35 das ankommende (einfarbige) Licht parallel NN , so verläßt es das Mineral mit Schwingungen parallel $N'N'$; α ist der Drehwinkel. Für Quarz z. B. beträgt er im Natriumlicht $21,72^\circ$ bei einer 1 mm dicken Platte. Ein Analysator N_1N_1 ,

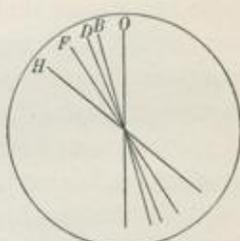


Fig. 36. Drehung der Schwingungsebene verschiedener Farben linear polarisierten Lichtes beim Durchgang durch eine zirkularpolarisierende Platte mit Linksdrehung.

Zirkularpolarisation findet man auch bei gewissen isometrischen Kristallen (z. B. nach H. Marbach [1854] beim Natriumchlorat) und außer bei optisch einachsigen, wie Quarz, Zinnober, bei zweiachsigen Stoffen. Flüssige Kristalle besitzen z. T. ein ganz außerordentlich großes Drehvermögen, ein um 3000 bis 4000 mal stärkeres nämlich, als es der Quarz aufweist.

Das innere Wesen der Zirkularpolarisation wird dadurch gekennzeichnet, daß es sich um eine besondere Doppelbrechungserscheinung handelt. Bei drehenden isometrischen Kristallen besteht die Strahlenfläche aus zwei kon-

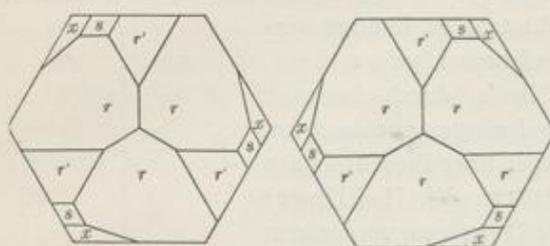


Fig. 37. Enantiomorphie des Quarzes.
Fig. 37a Linksquarz. Fig. 37b Rechtsquarz.

Beziehung zwischen Zirkularpolarisation und Kristallform.

Bezüglich der Kristallform der drehenden Substanzen gilt ein bedeutsames Gesetz. Es besagt, daß die beiden optisch entgegengesetzten Ausbildungen gewendet und zueinander enantiomorph sind; es fehlt ihnen wie im optischen Verhalten so auch in der Kristallform jede Spiegelungssymmetrie. Das hängt mit der allgemeinen Regel zusammen, nach der die Form eines Kristalls kein Symmetrieelement haben kann, welches im physikalischen Verhalten nicht besteht; die geometrische Symmetrie hat den niedrigsten Grad. Weil nun im optischen Verhalten zirkularpolarisierender Kristalle Symmetrieebenen keine Rolle spielen, so sind sie auch im geometrischen Bau ausgeschlossen. Er kann nur Drehungssymmetrie besitzen. Nicht aber sind alle Stoffe mit gewendeten Kristallformen optisch aktiv, wie man sich z. B. am nicht drehenden Sylvin überzeugen kann.

Nachahmung der Zirkularpolarisation.

Von hohem Interesse ist es fernerhin, daß es gelingt, die Erscheinung am zirkularpolarisierenden Quarze durch Kombinationen von recht dünnen Glimmerspaltblättchen nachzuahmen. Zu dem Zwecke schichtete E. v. Reusch (1869) eine größere Anzahl dieser Lamellen wendeltreppenartig unter jeweiliger Drehung von 120° nach rechts oder links zueinander auf. Entsprechend erzielte er die Erscheinung der Rechts- oder Linksdrehung.

Konoskopische Methoden. Eine herrliche Fülle der Erscheinungen bietet die Untersuchung der Kristalle im konvergenten, polarisierten Lichte dar, eine Methode, deren Ausbau in theoretischer und praktischer Hinsicht sich eine große Reihe von Forschern gewidmet hat; es seien besonders genannt D. Brewster, G. B. Airy, F. E. Neumann, A. Bertin, E. Lommel, A. Des Cloizeaux, A. v. Lasaulx, E. Bertrand, F. Becke. Die Betrachtung des konoskopischen Interferenzbildes läßt sich am Mikroskop durch einfache,

schon S. 594 erwähnte Kunstgriffe leicht ermöglichen; das Instrument eignet sich ganz besonders für die einschlägige Untersuchung dünner Präparate; bei dickeren Platten sieht man die konoskopischen Erscheinungen in ausgezeichneter Schönheit im Polarisationsinstrument von Nörremberg und von P. v. Groth. Auf einige besonders typische Verhältnisse sei nunmehr hingewiesen.

Selbstverständlich ergeben isometrische Kristalle auch konoskopisch keine Polarisationswirkung; sie sind ja wie die amorphen Körper in allen Richtungen isotrop. Anders die optisch einachsigen Substanzen. In Schnitten senkrecht

isotrope und anisotrope Körper bei konoskopischer Beobachtung.

zur Achse c liefern sie die schöne, einfach zu erklärende Erscheinung eines schwarzen Kreuzes mit (im Tageslicht bunten) im monochromatischen Lichte dunklen und hellen Ringen (Fig. 38). Beim Drehen des Präparates

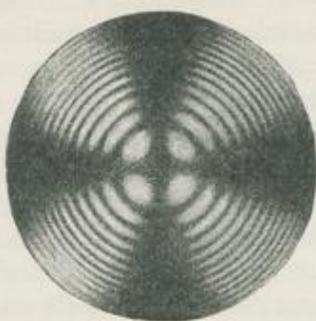


Fig. 38. Konoskopisches Interferenzbild einer optisch einachsigen Kristallplatte senkrecht zur optischen Achse. (Nach Hauswaldt.)

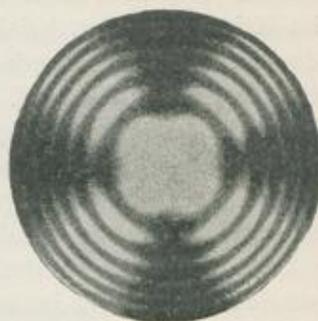


Fig. 39. Konoskopisches Interferenzbild einer zirkularpolarisierenden Quarzplatte. (Nach Hauswaldt.)

ändert sich die Erscheinung nicht, so daß sich die unendliche Zahl von vertikalen Symmetrieschnitten in drastischer Deutlichkeit kennzeichnet. Bei zirkularpolarisierenden Stoffen, wie beim Quarz, setzen die dunklen Kreuzesarme am innersten Ringe ab, es zeigt sich daher ganz entsprechend der Erscheinung im parallelen polarisierten Lichte (die ja im Mittelteil der konoskopischen Bilder wiederkehrt) ein im Tageslicht farbiges Innenfeld (Fig. 39).

Zu betonen ist, daß natürlich alle Schnitte optisch einachsiger Kristalle Interferenzsysteme ergeben. Ihre Symmetrie ist gekennzeichnet durch die Beziehung zum Rotationsellipsoid, dem optischen Symbol der in Rede stehenden Klasse.

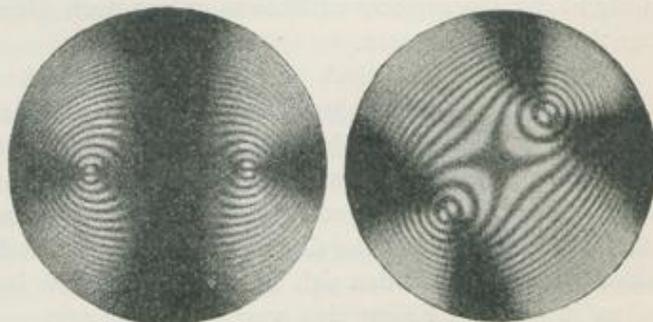


Fig. 40 a, b. Konoskopische Interferenzbilder optisch zweiachsiger Kristallplatten senkrecht zur ersten Mittellinie. (Nach Hauswaldt.)

Für die optisch zweiachsigen Kristalle sind besonders bedeutsam die Erscheinungen auf Schnitten senkrecht zu den Mittellinien, vor allem zur ersten. Je nach der Stellung zu den Nicolhauptschnitten hat man das Bild der Fig. 40 a oder 40 b. In letzterem ist der Einstich der optischen Achsen (am Scheitelpunkt der Hyperbeln) in erwünscht scharfer Art bezeichnet. Für die Größe des Winkels

der optischen Achsen ist demnach der Abstand dieser Punkte ein Maß, das man mit geeigneter Skala auswerten kann. In der Hinsicht zeigte E. Mallard (1882), daß es sich im konoskopischen Interferenzbilde um eine gerade Projektion handelt, bei welcher der Winkelabstand E der optischen Achsen vom Mittelpunkte des Gesichtsfeldes durch die sehr einfache Beziehung $k \cdot \sin E = D$ gegeben ist. k bedeutet ist die für das Mikroskop durch bekannte Beispiele festzustellende sog. E. Mallardsche Konstante und D die in Teilen einer Skala gemessene Entfernung eines Punktes vom Mittelpunkte des Feldes. Daß man solch wichtige Winkelgrößen, wie die der optischen Achsen im Kristall eine ist, bei Kenntnis des mittleren Brechungsexponenten selbst dann noch im konoskopischen Bilde ermitteln kann, wenn nur eine Achse im Bilde erscheint, haben F. Becke und E. F. Wright gelehrt. Auch hat man besondere Achsenwinkelapparate (Konometer) konstruiert, um den Winkel der optischen Achsen zu messen. Ist er so groß, daß die Achsen in Luft nicht mehr austreten, so drängt man ihn durch Eintauchen des Präparates in Öl oder andere starkbrechende Flüssigkeiten zusammen. Es handelt sich also bei solchen Messungen um den äußeren Winkel $2E_a$ in Luft oder $2H_a$ in Öl, nicht um den wahren $2V_a$ im Inneren des Kristalls; $2E_a$ und $2H_a$ sind aber ebenso charakteristisch für die Substanz wie $2V_a$ und mit ihm durch einfache Beziehungen verknüpft. Außer der Größe des Winkels der optischen Achsen ist der Grad seiner Dispersion für verschiedene Farben als Kennzeichen der Stoffe von hohem Wert. Die Farbenverteilungen an den optischen Achsen zeigen an, ob z. B. der Winkel für Rot größer ist als für Blau oder umgekehrt.

Fallen die Mittellinien oder die Ebenen der optischen Achsen auseinander, so macht sich die veränderte Symmetrie alsbald durch die Verteilung der Farbtöne im Achsenbilde geltend. Und so kann man z. B. erschließen, ob ein orthotrimetrischer, monokliner oder trikliner Stoff vorliegt. Vorbildlich sind in dieser Hinsicht der Dispersionsverhältnisse immer noch die schönen Untersuchungen von A. Des Cloizeaux.

Auf all diese praktisch wichtigen und oft farbenschönen Erscheinungen kann hier nur kurz hingewiesen werden, ebenso auf die Hilfsmittel, um im konvergenten polarisierten Lichte den Charakter der Doppelbrechung zu erkennen. Es handelt sich ja an dieser Stelle allein darum, die große Mannigfaltigkeit der Ausbeute optischer Untersuchung an Kristallen zu betonen. Es ist recht sehr zu hoffen, daß auch der Chemiker mehr und mehr diese so eleganten, schnell auszuführenden Methoden sich zu eigen macht. Sie können ihm bei seinen Arbeiten in tausend Fällen eine wertvolle Hilfe sein.

Optische Anomalien. Dem Bericht über besonders wichtige Umstände des normalen optischen Verhaltens der kristallisierten Stoffe seien ein paar Bemerkungen über nicht minder interessante optische Anomalien angeschlossen.

Es wurde schon von den ersten Forschern auf dem Gebiete der Kristalloptik wie D. Brewster (1781—1868) gefunden, daß Kristalle sich nicht selten optisch anders verhalten, als man nach ihrer Form erwarten muß. Geometrisch isometrische Gebilde erweisen sich zuweilen als anisotrop, hexagonale als zwei-

achsig und dergleichen mehr. Die Erklärungen liegen in verschiedenen Umständen. Einmal handelt es sich um Spannungserscheinungen. In ausgezeichneter Art kann man das am Glase erkennen, das beim Drücken oder Ziehen, auch bei ungleicher Erwärmung, oder nach schneller Abkühlung doppelbrechend ist. Dabei sieht man deutlich, wie in schlecht gekühlten, gespannten Gläsern die Form der Oberfläche sich geltend macht, insofern z. B. bei viereckiger Gestalt sich eine Sektorenteilung im Anschluß an die vier Randteile zeigt, bei achteckigen Gläsern eine Achtfeldergliederung, bei runden eine konzentrische Aufteilung im polarisierten Lichte erscheint.

Ganz ähnlich und auf innere Spannungen zurückzuführen ist das Verhalten mancher isometrischer Mischkristalle, z. B. nach F. Klocke des Alauns. R. Brauns erwies, daß chemisch einheitliche Kristalle dieser Verbindung, etwa reine Tonerdealaune, isotrop sind, ihre isomorphen Mischungen z. B. mit Chromalaun aber doppelbrechend; dabei zerfällt ein Oktaeder gemischten Alauns in Sektoren, deren Basis die acht Kristallflächen sind, und deren Spitzen im Mittelpunkte des Oktaeders zusammentreffen. Man erkennt also auch hier den Einfluß der Begrenzungselemente.

Im übrigen ist bei der Erklärung dieser Erscheinungen zu bedenken, daß nach O. Wiener eine sehr feine Schichtung isotroper Teile, die bei isomorphem Zusammenkristallisieren gewissermaßen durch Pulsieren des Ausscheidungsvorganges sehr wohl zustande kommen kann, Doppelbrechung bewirkt.

Nur scheinbar abnorm sind manche Paramorphosen. Es sind das Kristalle, die in eine zweite Gleichgewichtslage übergegangen sind, ohne ihre Form merklich zu ändern. Das trifft in sehr interessanter Weise beim Leuzit zu, der in Laven, also bei hoher Temperatur isometrisch in Form von Ikositetraedern entstand, bei 700° aber in eine orthotrimetrische, also doppelbrechende Art unter Beibehaltung der isometrischen Gestalt sich verwandelte. So herrscht denn bei gewöhnlicher Temperatur ein Gegensatz zwischen Form und Optik, der aber von C. Klein durch den Nachweis der Modifikationsänderung aufgeklärt wurde.

Die optische Anomalie des Leuzits ist also nur eine scheinbare. Das nämliche ist der Fall bei den Erscheinungen der Mimesie, wie man sie in höchster Vollendung beim Borazit findet. Er stellt ein in allen Feinheiten des Winkelbaues und der Flächenanlage isometrisch tetraedrisch-hemiedrisches Mineral vor, das sich bei der optischen Untersuchung überraschender Weise als orthotrimetrisch und regelmäßig verzwillingt erwies. In ihm liegt einer der Fälle vor, bei denen, wie insbesondere E. Mallard zeigte, niedersymmetrische Kristallstrukturen sich höhersymmetrischen durch Zwillingsbildungen nähern. Der Borazit ist nicht etwa isometrisch entstanden und paramorphosiert, sondern von vornherein kraft seiner mimetischen Art mit scheinbar isometrischer Form und optisch orthotrimetrischem Wesen gebildet. Ein anderes schönes und verbreitetes Beispiel solcher Mimesie ist der trikline Mikroklinfeldspat, der geometrisch kaum vom monoklinen unterschieden werden kann. Möglicherweise sind die sog. Orthoklase derart fein verzwillingte Mikrokline, daß auch die

optischen Mittel bei der Erkennung des triklinen Gefüges versagen. Derartige Bauten scheinbar höherer Symmetrie bezeichnet P. v. Groth, wie schon S. 584 erwähnt wurde, als Fälle der Polysymmetrie.

IV. Thermische, magnetische und elektrische Verhältnisse der Kristalle. Die enge Verknüpfung von Kristallographie und Physik zeigt sich nicht zum wenigsten in der Gemeinsamkeit mancher Lehr- und Arbeitsgebiete. Wie weit es Aufgabe der Mineralogen sei, die physikalischen Eigenschaften der Kristalle in ihren Hochschulvorträgen zu behandeln, und was in der Hinsicht gewissermaßen von Amts wegen an Bemühungen zur Ausdehnung und Vertiefung der wissenschaftlichen Kenntnis dem experimentierenden und theoretisierenden Mineralogen und was dem Physiker obliege, darüber gehen die Meinungen stark auseinander. Insbesondere ist das bezüglich der thermischen, magnetischen und elektrischen Eigenschaften der Fall. Am verbreitetsten ist wohl die Neigung, der mineralogischen Behandlung nur die Umstände zu überweisen, die für die allgemeine Auffassung der Kristallnatur wichtig, für die Kennzeichnung der Arten bedeutungsvoll sowie für die Ausarbeitung mineralogisch-petrographischer Methoden wertvoll sind. So müßig an sich eine solche Scheidung der Wissensgebiete ist, so erscheint eine entsprechende Einengung, z. B. des mineralogischen Unterrichtsbetriebes, praktisch doch nicht unberechtigt. Sie sei auch hier im obigen Sinne befolgt.

Thermische
Eigenschaften.

Den Mineralogen interessieren von den thermischen Eigenschaften der Stoffe in hohem Maße die Gestaltsveränderungen, welche die Kristalle bei Temperaturwechsel erfahren.

Gestaltsveränderung
der Kristalle
durch die Wärme.

Die ersten Beobachtungen darüber machte F. E. Mitscherlich (1823), auch haben sich frühzeitig F. E. Neumann (1833) und H. Fizeau (1864) u. a. auf diesem Gebiete eingehend betätigt. Das durch den Entdecker der thermischen Deformation von Kristallen klassisch gewordene Beispiel ist der Kalkspat. Mitscherlich maß den Winkel seiner Rhomboederflächen bei 10° zu $74^{\circ} 55\frac{1}{2}'$. Um die etwaige Änderung bei erhöhter Temperatur feststellen zu können, ließ er den Kristall in ein Bad erwärmten Quecksilbers eintauchen, aus welchem sich die am Goniometer einzustellende Fläche nur für ganz kurze Zeit erhob. Er fand den entsprechenden Winkel bei 110° zu $75^{\circ} 4' 2''$, mithin eine Veränderung von $8' 32''$. Es handelt sich also um eine ziemlich geringe Umgestaltung der Kalkspatkristalle. Bei anderen Stoffen ist es ähnlich. Natürlich gestatten solche goniometrische Untersuchungen es noch nicht, die Werte der Ausdehnung in verschiedenen Richtungen zu bestimmen. Mitscherlich hat sich aber auch bereits in der Hinsicht durch Studien über die Volumdilatation des Kalkspats bemüht.

Der Überblick über die einschlägigen Erfahrungen macht es anschaulich klar, daß es sich bei dem Einfluß der Wärme auf Kristalle stets um zentrisch symmetrische homogene Deformationen handelt. Gegensätze hinsichtlich Richtung und Gegenrichtung gibt es in der Hinsicht nicht. Bei isometrischen Körpern hat man auch keinen Wechsel des Deformationsgrades mit der Richtung. Der Würfel bleibt ein Würfel, das Oktaeder besitzt für jeden Wärmegrad einen

Kantenwinkel von $70^{\circ}31'34''$; alle regelmäßigen Formen bleiben sich in ihren Flächenneigungen gleich. Eine Kugel verändert ihre allgemeine Form nicht, nur ihr Volumen, und zwar beim Erwärmen meist in positivem Sinne; gelegentlich (so beim Diamant voraussichtlich um -42°) soll es, wie beim Wasser um $+4^{\circ}$, in der Hinsicht einen Wendepunkt geben.

Hexagonale, tetragonale und trigonale Kristalle zu Kugeln gedreht werden bei Temperaturänderungen zu Rotationsellipsoiden mit der Hauptachse als Drehrichtung. Die bekanntesten Beispiele sind Quarz mit einem Ausdehnungskoeffizienten von 0,0000781 nach Achse c und 0,0001419 in allen Richtungen senkrecht c. Beim Erwärmen bildet sich also die Kugel zum abgeplatteten Ellipsoid um, Kalkspat hingegen wird zu einem verlängerten Ellipsoid; er dehnt sich nach der Hauptachse aus ($\alpha = 0,00002621$) und zieht sich senkrecht dazu zusammen ($\alpha = -0,0000540$), was gleichfalls von Mitscherlich bereits erkannt wurde. Ein Kalkspatstab, der $65^{\circ}49\frac{1}{2}'$ gegen Achse c geneigt ist, bewahrt seine Länge bei allen Temperaturen. Die Rechtwinkligkeit von Basis zum Prisma sowie die Flächenwinkel in der Zone der Vertikalen werden natürlich bei allen wirteligen Kristallen beibehalten; schräge Flächen aber verändern ihre Neigung.

Bei allen orthotrimetrischen Kristallen wird eine Kugel zum dreiachsigen Ellipsoid mit den kristallographischen Richtungen a, b und c als F. E. Neumannsche thermische Achsen, bei monoklinen kommt eine der Hauptrichtungslinien dieses Ellipsoides in b zu liegen, die anderen lagern in der zu b senkrechten Ebene, doch wechselnd mit der Temperatur, bei triklinen Kristallen liegt das Ellipsoid schief im Kristall, mit den Wärmegraden wandernd, wie J. Beckenkamp am Anorthit zeigte (1881).

Hiernach lassen sich fünf Gruppen mit verschiedenen thermischen Deformationen aufstellen: eine isometrische, eine wirtelige Abteilung und die des orthotrimetrischen, monoklinen und triklinen Systems.

Daß bei allen homogenen Deformationen durch die Wärme außer der Symmetrie der Zonenverband, somit auch die kristallographischen Indizes sich nicht ändern, sei hier nochmals hervorgehoben.

Wie die Geometrie, so hängt auch die Optik eines Kristalls von der Temperatur ab. Die bei Zimmerwärme erzielten Daten der Brechungsexponenten gelten eben nur für diese Bedingung. Erwärmen und Abkühlen verursacht Veränderungen unter Erhaltung der Symmetrie, solange kein Modifikationsumschlag sich ereignet. Bei amorphen Körpern und isometrischen Kristallen fallen oder steigen die Brechungsexponenten mit der Erhöhung der Wärmegrade, wofür Steinsalz und Diamant Beispiele sind. Diese Gegensätzlichkeit der Wärmewirkung zeigt, daß hier eine komplexe Erscheinung vorliegt; sie wird mit C. Pulfrich als Übereinanderlagerung der Volumen- und der Absorptionsveränderung aufzufassen sein. Da erstere im allgemeinen bei Steigerung der Temperatur sich als Weitung des Kristallgebäudes äußert, so wirkt sie verkleinernd auf den Brechungsexponenten. Die gleichzeitige Änderung der Absorption des Lichtes veranlaßt dagegen sein Ansteigen. Je nachdem die

Einfluß der Temperatur auf die optischen Eigenschaften.

eine oder die andere Wirkung überwiegt, ist der Effekt auf die Brechung verschieden. Bei Steinsalz, Sylvin und Flußspat ist die kubische Ausdehnung sehr beträchtlich, die Absorption gering, beim Diamant der thermische Effekt unbedeutend. Optisch einachsige Körper verändern o und e ungleichmäßig; also verstärkt oder vermindert sich die Doppelbrechung; optisch zweiachsige lassen natürlich einen Wechsel von drei Hauptbrechungsexponenten für jede Farbe zu. Damit ist eine gelegentlich sehr drastische Wandlung in der Größe des Winkels der optischen Achsen gegeben. Ausgezeichnet kräftig und wunderschön in seiner Farbenpracht anzuschauen ist in der Hinsicht der Gips, dessen Schnitte gegen die 1. Mittellinie beim Erwärmen, wie F. E. Mitscherlich zuerst beobachtete, das Schauspiel des Zusammengehens der optischen Achsen bis zur Größe 0^0 (nacheinander für verschiedene Lichtsorten) und des Auseinanderwanderns in einer Ebene senkrecht zur vorigen zeigen. Die eine Achse bewegt sich dabei nach F. E. Neumann im ersten Stadium der Veränderung um die Hälfte schneller als die andere. Beim Rücklauf der Temperatur folgt auch die Optik. Entsprechend kann es bei anderen Stoffen zum Wechsel der Zirkularpolarisation, der Auslöschungsrichtungen und anderer optischer Verhältnisse kommen. Bei Metallen ist die Temperatur eigenartigerweise ohne Einfluß auf die Brechung.

Wärmeausbreitung in Kristallen.

Außerordentlich anschaulich sind Versuche H. de Senarmonts (1847), welche die Ausbreitung der Wärme in einem Kristall bezeugen: man überzieht eine Kristallplatte mit zarter Wachsschicht, setzt auf sie eine Wärme zuführende Nadel und beobachtet den Schmelzhof um die Ansatzstelle. Nach dem Abkühlen bleibt er sichtbar und zeigt in seiner Form die Wärmeausbreitung an. W. C. Röntgen (1874) hat vorgeschlagen, behauchte Flächen mit einer heißen Metallspitze zu berühren. Der Hauch verdunstet in einem der Schmelzfigur Senarmonts entsprechenden Areal, dessen Umrahmung durch Bestäubung der Platte mit Lycopodiumsamen festgehalten wird. Das Pulver haftet nur an den noch hauchhaltigen Stellen, so daß der Wärmeausbreitungshof ziemlich genau ausgemessen werden kann. Bei isometrischen Körpern bildet sich als Isotherme stets ein Kreis, bei wirtelig gebauten Kristallen ein solcher auf der Basis, im übrigen beobachtet man Ellipsen. Sie liegen entsprechend der Symmetrie, die der Kristallfläche in der in Rede stehenden Hinsicht eigen ist, und zwar sind die Sinnbilder, die ganz der Dilatationswirkung der Wärme entsprechen, Kugel, Rotationsellipsoid und dreiachsiges Ellipsoid, also zentrisch symmetrische Körper. Eine ganze Reihe von theoretischen Untersuchungen, so von J. M. C. Duhamel, G. G. Stokes, G. Lamé u. a., hat sich den Beobachtungen Senarmonts angeschlossen. Physikalische Lehrbücher geben davon nähere Kunde.

Schmelzbarkeit und Amorphisierungspunkt.

Unter dem Rüstzeug der Mineralogen älterer Generation befand sich als besonders wichtiges Instrument das „Lötrohr“, mit dem außer chemischen Prüfungen insbesondere die Schmelzbarkeit von Mineralien untersucht wurde. F. v. Kobell stellte eine Skala: Antimonglanz, Natrolith, Almandin, Strahlstein, Adular, Bronzit, Quarz auf, deren Glieder als Vergleichskörper für sehr leichte

und immer schwierigere Schmelzfähigkeit dienen sollten. Natürlich handelt es sich dabei um rohe Werte. Bei genaueren Untersuchungen ist es von grundlegender Bedeutung sich zu vergegenwärtigen, daß der Akt des Schmelzens, also des Erweichens und Verflüssigens, zwar häufig an einen bestimmten Temperaturpunkt geknüpft ist, daß er aber vielfach ein Temperaturintervall, gelegentlich von Hunderten von Graden, einnimmt, ersteres zumeist bei reinen kristallisierten Stoffen, letzteres stets bei amorphen Körpern, bei mechanischen Gemischen verschiedenartiger Kristalle, auch bei den molekularen Mischungen sog. fester Lösungen. Daß einige chemisch reine kristalline Minerale, wie Quarz, Orthoklas, Spodumen, beim Erhitzen ganz langsam erweichen, ist bereits S. 544 hervorgehoben; zahlreiche Untersuchungen C. Doelters und seiner Schüler haben ergeben, daß diese Umstände allmählichen Schmelzens bei vielen Silikaten eine große Rolle spielen.

Ersichtlich darf also der Vorgang des Schmelzens nicht mit dem der Amorphisierung kristalliner Stoffe identifiziert werden; die Akte können zusammenfallen, tun es aber durchaus nicht immer. Diese Erkenntnis hat den nicht unbeträchtlichen Wirrwarr gelichtet, der bezüglich der Schmelzbarkeit von Kristallen und ihrer Bestimmung bestand. Dabei ist natürlich die Wertschätzung der Schmelzbarkeitsfeststellung als Anhalt für die Modifikationsänderung kristallin \rightarrow amorph gesunken; scharfe Punktwerte kann nur die Untersuchung der Amorphisierung geben. Das haben insbesondere A. L. Day und seine Mitarbeiter, auch K. Endell und R. Rieke in recht interessanten Darlegungen gezeigt. Zur Erkennung des Vorganges kristallin \rightarrow amorph bzw. seiner Umkehrung dient schicklich die Wärmetönung, welche die Amorphisierung bzw. das Kristallisieren begleitet. Sie drückt sich auf den Erhitzungs- oder Abkühlungskurven durch Knicke mehr oder minder deutlich aus. Zum näheren Studium sind auch die Diskontinuitäten in der Wandlung des spezifischen Gewichtes und der optischen Eigenschaften mit Erfolg verwertet worden.

Um einen Anhalt für die Lage der Amorphisierungspunkte bei Mineralien zu geben, seien einige Zahlen nach den Angaben des geophysischen Carnegie-Instituts hier angeführt; Steinsalz 800°; Diopsid 1391°; Anorthit 1552°; Quarz 1601°; Kalkolivin 2130°.

Die magnetischen Eigenschaften können hier unter Hinweis auf Lehrbücher der Physik übergangen werden, von den elektrischen sei die so außerordentlich interessante und praktisch wichtige Erscheinung der Empfindlichkeit mancher Mineralien, wie Eisenkies, gegen elektrische Wellen erwähnt, insbesondere weil nach den Untersuchungen von Th. Liebisch im Zinnstein ein kristallines Material vorliegt, das in schönster Deutlichkeit die Abhängigkeit auch der in Rede stehenden rätselhaften Eigenschaft von der Richtung im Kristallgebäude zeigt. Die Pyramidenflächen des Zinnsteins sind vorzügliche Detektoren elektrischer Wellen, den Prismenflächen desselben Kristalls geht diese Eigenschaft so gut wie ganz ab.

Eine andere mineralogisch sehr bedeutsame und ungemein interessante, auch leicht demonstrierbare elektrische Eigenschaft, die sog. Pyroelektrizität,

Elektrische Eigenschaften von Kristallen.

Mineralien als Anzeiger elektrischer Wellen.

Pyroelektrizität.

sei hier gleichfalls kurz gewürdigt. Es handelt sich um das Auftreten positiver und negativer Elektrizität an der Oberfläche von Kristallen, die im Temperaturwechsel begriffen sind. Klassisch ist in der Hinsicht der trigonale, nach der Hauptachse hemimorphe Turmalin, der diese Gegensätze elektrischer Erregung an den Enden zeigt, wie schon Aepinus (1756) beobachtete. Der beim Erwärmen positive Pol heißt nach P. Rieß und G. Rose analog, der negative antilog. Beim Abkühlen dreht sich das Verhältnis um. Polarpyroelektrisch nach den drei Nebenachsen ist der Quarz, sehr schön zeigt durch die Verteilung von $+$ und $-$ -Elektrizität der Skolezit seine monoklin-hemiedrische Natur an.

In prächtiger Deutlichkeit traten solche Verhältnisse bei dem Versuch A. Kundts (1883) heraus: er benutzte einen Zerstäubungsapparat, durch dessen mit einem engmaschigen Sieb aus Baumwolle versehene Öffnung ein Gemisch von Schwefel und Mennige geblasen wurde. Die positiv elektrisch gewordene Mennige setzt sich auf die negativen, der Schwefel auf die positiven Kristallteile, so daß der Farbengegensatz von rot und gelb die Verteilung der Elektrizität aufs beste bekundet. Man stellt den Versuch beim Abkühlen des Kristalls an.

Durch Druck in Richtung einer polaren Symmetrieachse entwickelt man bei gewissen Kristallen „Piëzoelektrizität“, und zwar wird der thermisch antilige Pol positiv elektrisch.

V. Vergleich der gestaltlichen und physikalischen Symmetrie von Kristallen. Der Überblick über die geometrischen und physikalischen Eigenschaften der Kristalle zeigt, daß erstere die weitgehendste Gruppeneinteilung nach Symmetrieverhältnissen gestatten; sie stellen die Symmetriegesetze niederster Ordnung dar. Dabei ist es besonders wichtig, daß jede geometrische Symmetrie auch eine physikalische ist, nicht etwa umgekehrt. In gewissen Eigenschaften stimmen der gestaltliche und physikalische Symmetriegrad überein; so z. B. hinsichtlich der Spaltbarkeit, der Lage von Gleitungs- und Zwillingsleitungsflächen, auch der Pyroelektrizität. Bei den homogenen Deformationen durch Erwärmen fällt schon das Moment des in den Gestalten sich oft dokumentierenden Gegensatzes von Richtung und Gegenrichtung fort, gleichwie bei der Fortpflanzung der Wärme und des Lichtes. Am anschaulichsten tritt die oft ganz außerordentlich viel höhere Symmetrie gegenüber der geometrischen Erscheinung bei den optischen Eigenschaften heraus; in der Hinsicht sei z. B. auf den Gegensatz etwa eines Flußspatwürfels mit seinen neun geometrischen Symmetrieebenen und dem optischen Symbol des Minerals, der unendlich vielmals symmetrischen Kugel, hingewiesen.

Chemische Kristallographie.

I. Verhältnis der Mineralogie zur Chemie. Der Ausspruch R. J. Haüy's „que la chimie et la cristallographie, si longtemps isolées, ont contracté une liaison étroite, et se sont promis de ne plus se quitter“ hat sich im Laufe der mehr als elf Jahrzehnte, die seitdem verflossen sind, glänzend bewahrheitet.