

ALLGEMEINE KRISTALLOGRAPHIE  
UND MINERALOGIE

VON FR. RINNE.

ALLGEMEINE KRYSTALLOGRAPHIE  
UND MINERALOGIE

VON  
A. BRAUER

die  
ih  
sch  
wi  
H  
Sc  
in

fi  
Pe

ma  
vo  
Ze  
de

mi  
ab  
kle  
da  
pu  
Hi

Ar  
re  
Da  
br  
die  
be

Sc  
ph

# ALLGEMEINE KRISTALLOGRAPHIE UND MINERALOGIE.

VON FRIEDRICH RINNE IN LEIPZIG.

Einleitung. Die Wurzeln der Mineralogie erstrecken sich weit hinein in die benachbarten Felder der Chemie, Physik und Mathematik. Ein Zeichen ihres engen Verbandes mit all diesen Wissenschaften ist die häufige Gemeinschaft von Führern der Forschung: Chemiker, Physiker und Mathematiker wie Mitscherlich, Bunsen, Wöhler, van't Hoff und Roozeboom, Huygens, Brewster, Biot, Fresnel, Kundt, F. E. Neumann und Sohncke, um nur einige große Tote zu nennen, haben einen Ehrenplatz auch in der Geschichte der Mineralogie.

Und wie zwischen ihr und den genannten Wissenschaften die Grenzen verfließen, so steht sie in breitem Zusammenhange mit der Geologie; das Feld der Petrographie verbindet die beiden auf das innigste.

Für den Fortschritt unserer Wissenschaft war ihre Verknüpfung mit mancherlei Nachbardisziplinen von günstigstem Einfluß; die Mineralogie hat von ihnen viele frische Impulse empfangen. Auch heute steht sie unter dem Zeichen starker von außen kommender Anregungen, und zwar insbesondere derer, die in so reichem Maße von der physikalischen Chemie ausgehen.

Eine Folge ihrer Vielseitigkeit ist es, daß die Darlegung des Wesens der mineralogischen Wissenschaft beträchtlich von der Auffassung des Verfassers abhängt. Um daher die Tendenz der Betrachtungen, die dem Leser dieses kleinen Werkes dargeboten werden, gleich anfangs klarzulegen, sei bemerkt, daß es mir vor allem daran lag, zu zeigen, nach welchen allgemeinen Gesichtspunkten die mineralogische Forschung sich gegenwärtig gestaltet und mit Hilfe welcher Methoden ihre Erweiterung und Vertiefung sich vollzieht.

Natürlich fußt die Mineralogie von heute auf dem Alten, und in dankbarer Anerkennung soll im Gange der Erörterungen stets der Großtaten einst führender Forscher gedacht werden. Eine weit zurückgreifende zeitlich geordnete Darlegung der Verhältnisse schien mir indes im vorliegenden Fall nicht angebracht, bei dem es sich um den kurzen Überblick über eine Wissenschaft handelt, die im raschen Laufe von nicht viel mehr als hundert Jahren erblüht ist, und bei deren Entwicklung die Teilgebiete innig miteinander verwoben sind.

## Einführende Betrachtungen.

I. Das mineralische Reich und seine Erforschung. Von den Aufgaben der Mineralogie.  
Schalen unseres Erdballs, wie sie in erster Unterscheidung als luftige Atmosphäre, als ozeanische Hydrosphäre sowie als der steinerne Boden der Lithosphäre

sich darstellen, ist letztere die eigentliche Domäne der Mineralogie. Das feste Material des Erdgebäudes also hat der Mineraloge in seinem Wesen zu ergründen.

Doch es stellt sich bald heraus, daß hier keine bestimmten wissenschaftlichen Grenzen innegehalten werden können. Die Mineralogie kann des eifrigen Studiums der Hydrosphäre nicht entraten, die das Medium ist, in dem ein Hauptteil der Minerale sich bildet, und die mit der Lithosphäre durch ständige Wechselwirkung verknüpft ist. Das trifft auch zu für die Atmosphäre und in gewissem Maße für die vierte Zone des Erdballs, für die Biosphäre, das Reich des Organischen, das auf dem festen Untergrunde gedeiht und die Hydrosphäre und Atmosphäre gewissermaßen durchstäubt. Helfen doch mineralisch gewordene Reste dieser Zone, die kalkigen, kieseligen und kohligen Biolithe, in gewaltiger Beteiligung am Ganzen den steinernen Leib der Erde aufbauen.

Natürlich ist es nicht nur die frei vorliegende Außenzone der Lithosphäre, die als mineralisches Material in Betracht kommt; Bergbau und Bohrungen liefern Proben aus größerem Abstände von der Erdoberfläche, und Schlußfolgerungen führen den mineralogischen Gedankengang zu Betrachtungen über die Art der Tiefenmaterialien, die ja die Hauptmasse unseres Sternes bilden. Hochwillkommen an sich und als Vergleichsgegenstände mit den Erdstoffen sind schließlich die außerirdischen Mineralien, die als Meteoriten sich mit der Erde vereinten.

So ist denn in der Tat das Forschungsgebiet der Mineralogie ein außerordentlich großes: ihren Anhängern gilt es, das mineralische Wesen der ganzen festen Erdkruste für sich und in seiner Beziehung zur Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und zum Erdinneren zu ergründen.

Die unendliche Fülle von Arbeit, die solch eine Aufgabe mit sich bringt, läßt sich am ehesten nach den Eigenschaften des Materials gliedern in Studien mathematisch-geometrischer Art, die Bezug nehmen auf die morphologischen Verhältnisse, weiter in solche wesentlich physikalischer und in die chemischer Natur. Dazu tritt die Erforschung der Vergesellschaftung der Mineralien zu größeren Verbänden, zu Lagerstätten und Gesteinen. Das gibt zusammen eine Fülle wertvoller Daten. Ihr Hauptinteresse erhalten sie aber erst durch Verfolgung des Gedankens, daß nichts besser hilft, das Wesen eines Dinges zu erkennen, als die Erkundung seiner Entstehungsgeschichte. Aus der Einengung, wie sie eine rein beschreibende Naturwissenschaft mit sich bringen würde, haben die Jünger der Mineralogie immer gern hinausgestrebt in dem Bemühen, durch Betrachtungen über die Genesis der mineralischen Stoffe die Auffassungen zu weiten. In dem Sinne wird die heutige mineralogische Wissenschaft sehr wesentlich durch die Anwendung der physikalischen Chemie gefördert; sie hat mit erfreulicher Rücksichtslosigkeit manche verschwommenen falschen Vorstellungen verjagt, die früher gerade bei Erwägungen über die Bildung der Mineralien unterliefen, und hat exakte Begriffe über die Entstehungsbedingungen der Stoffe an ihre Stelle gesetzt.

Mehr in den Hintergrund getreten sind in neuerer Zeit Erörterungen über die Prinzipien der Klassifikation. Das ist wohlverständlich im Hinblick

auf die bislang verhältnismäßig geringe Bedeutung der Systematik für die Erkenntnis des Wesens der Mineralien. Es fehlt ja hier das in der Zoologie und in der Botanik fundamental wichtige Moment der Verknüpfung der Objekte durch entwicklungsgeschichtliche Beziehungen. In der Hinsicht ist das Mineralreich starr konservativ. Der erste auf der Erde entstandene Feldspat war in seinem allgemeinen Wesen gleich dem heutigen und gleich dem, der in fernster Zukunft sich bilden mag. Um so wichtiger und voll Interesse sind die Untersuchungen über die Gesetze des Zusammenvorkommens insbesondere auf dem Felde der zur Petrographie überleitenden Teile der Mineralogie.

Schließlich ist auf den sehr erfreulichen Umstand im Charakter unserer Wissenschaft hinzuweisen, daß vom Beginne der Forschungen im Reiche des Kristallinen an, seit Huygens und Haüy bis heute, gewissermaßen eine Philosophie der Kristallographie ihre eifrigen Bekenner gefunden hat, die es in immer neuem Bemühen versucht haben, durch Erwägungen über den molekularen Aufbau der Kristalle das Wesen der regelmäßig gefügten anorganischen Stoffe zu erklären. Ganz kürzlich ist dies Feld der Forschung auch dem Experiment zugänglich geworden.

II. Das Wesen kristalliner Materie. Beim Studium der Mineralien zeigt sich ein Dualismus ihrer allgemeinen Art; er wird durch die Namen kristalliner und amorpher Zustand herausgehoben. Für den einen sei der Quarz, für den anderen der Opal als Beispiel hingestellt. Wir stehen somit der Aufgabe gegenüber, das Wesen dieses Gegensatzes zu erhellen.

In Figur 1 tritt dem Beschauer ein Quarz als Bergkristall entgegen, als Einzelwesen von der übrigen Welt abgeschlossen, umkleidet von regelmäßig-flächig-kantig-eckiger, nach außen konvexer Gestalt und durch sie gekennzeichnet.

So charakteristisch diese äußere Form für das kristalline Material Quarz erscheint, so begreift sie doch nicht das ganze Wesen des Gebildes. Der Ausdruck großer Regelmäßigkeit, wie er sich in der Kristallform offenbart, mag fehlen und doch hört das Material nicht auf kristalliner Art zu sein; der kristalline Zustand kann sich durch Kristallgestalt ausdrücken, er braucht es aber nicht. Würde man z. B. den Bergkristall in kleine unregelmäßige Stücke zerstampfen, so bliebe doch jedes Teilchen kristallin. Häufig genug entbehren ja auch natürliche kristalline Stoffe des schönen Flächenschmuckes, so der Quarz und der Feldspat im Granit; kaum angedeutet ist er beim Glimmer dieses Gesteins, dem häufigsten dritten Stoffe im granitischen Mineralaggregate, und doch hat man es bei allen dreien mit kristalliner Materie zu tun. Andererseits hätte ein in Bergkristallform geschliffenes Stück Glas oder Opal durchaus nicht die Natur eines Kristalls, so wenig wie die bekannten regelmäßigen Basaltsäulen, entgegen der Annahme des Freiburger Mineralogen G. A. Werner, Kristalle sind.

Da fragt es sich nun, was das Wesen kristalliner Materie sei. Am ehesten wohl läßt es sich in folgenden kurzen Sätzen beschreiben: der kristalline

Zweifaches  
Wesen der  
Mineralien.



Fig. 1.  
Quarzkristall.

Definition des  
Kristallinen.

Stoff ist homogen und besitzt gesetzmäßig mit der Richtung wechselnde Eigenschaften.

Das erste dieser Kennzeichen eines einfachen Kristalls drückt sich darin aus, daß in ihm keine Stelle vor anderen ausgezeichnet ist. Es liegen also im Kristallindividuum ganz andere Verhältnisse vor wie etwa im Pflanzen- oder Tierkörper, die sich in eine Mannigfaltigkeit von Organen aufteilen und deren feinsten Aufbau aus Zellen mit Kern, Plasma und Zellhaut den geraden Gegensatz zur ganz gleichmäßigen Art der Kristalle ausmacht. In diesen trifft man, auf parallelen, gleichgerichteten Linien wandernd, keine Änderung des chemischen und physikalischen Verhaltens, wenigstens soweit die zur Verfügung stehenden Untersuchungsmittel es erkennen lassen. Im allgemeinen verschieden aber sind die Eigenschaften kristalliner Materie auf richtungsungleichen Graden. Das sagt bereits die etwaige kristallographische Form. In regelmäßiger Anordnung treten Flächen, Ecken und Kanten an ihr auf. Radien einer Kugel, die konzentrisch um den Bergkristall gezogen sei, treffen die Kristalloberfläche nicht in überall gleichen, sondern in verschiedenartigen Punkten, wobei aber eine bestimmte Gesetzmäßigkeit sich alsbald ergibt. So bestehen sechs Kugelstrahlen, die im Winkelabstand von  $60^\circ$  senkrecht auf die vertikalen Flächen  $\phi$  des Bergkristalls der Fig. 1 stoßen und zwei Linienbüschel die sich aus je sechs regelmäßig gruppierten Loten auf den verbreitert gedachten Flächen  $\nu$  am Kopfe und Fuße des Kristalles zusammensetzen. In gesetzmäßiger, sprungweise mit der Richtung wechselnder Art ist also der Bergkristall durch Flächen ornamentiert.

Wechsel der  
Formverhält-  
nisse mit der  
Richtung.

Wechsel der  
physikalischen  
Verhältnisse mit  
der Richtung.

Ganz entsprechend tritt in der Spaltbarkeit eine nach bestimmten Regeln diskontinuierlich geordnete Eigenschaft bei vielen Kristallen heraus. Diese sehr merkwürdige Tatsache, daß es in Kristallgebäuden ganz bestimmte Ebenen geben kann, parallel denen sich eine Blättchenzerteilung vollziehen läßt, ist zwar nicht am Bergkristall, aber an vielen anderen kristallinen Stoffen leicht zu erläutern, so am Steinsalz, das man nach den drei Ebenen des Würfels, am Flußspat, den man nach den vier Flächenpaaren des Oktaeders spalten kann. Es gibt demnach z. B. beim Steinsalz drei gesetzmäßig, nämlich senkrecht zu den Würfelflächen orientierte Richtungen, in denen der Zusammenhalt der Teile ein Minimum besitzt; beim Flußspat deren vier. Von besonderem Interesse ist der sprungweise regelmäßige Wechsel der Kohäsionsverhältnisse beim Glimmer. Mit allergrößter Leichtigkeit läßt sich ein Blättchen des Minerals bekanntermaßen nach seiner Ebene auseinanderteilen, während Versuche, es nach Flächen schräg zu dieser Ebene zu zerspalten, negativ verlaufen. Es gelingt aber, noch andere Lösungen des Zusammenhaltens im Glimmerkristall durch die sogenannte Körnerprobe zu vollziehen. Beim kurzen, kräftigen Einschlagen einer Nadel in die Spaltfläche des Minerals bildet sich eine sechsstrahlige „Schlagfigur“, die, an wechselnder Stelle hergestellt, stets gleiche Richtung der Arme zeigt. Auf schönste tritt durch diesen Versuch heraus, daß und wie die Kohäsionsverhältnisse der in Rede stehenden Materie mit der Richtung gesetzmäßig wechseln.

Ein Rhythmus der Eigenschaften läßt sich auch hinsichtlich der Härte feststellen, die hier als Widerstand gegen Verletzungen angenommen sei. Den Bearbeitern vom Diamant ist es wohlbekannt, daß sich an dem Edelstein Würfelflächen durch Schleifen schwerer herstellen lassen als Facetten nach dem Oktaeder. Insbesondere drastisch zeigen sich mit der Richtung wechselnde Verhältnisse der Ritzbarkeit beim Disthen. Auf seiner länglichen Hauptfläche machen sich in der Hinsicht ungemein starke Gegensätze bemerkbar, derart, daß beim Ritzversuch eine parallel zur Längsrichtung des Disthens geführte stählerne Nadel kräftig eindringt, sich ihm also überlegen zeigt, daß hingegen beim Zug des Stahles quer zur Hauptrichtung ein Ritzerfolg sich nicht erzielen läßt.

Eine Anschauung der regelmäßig mit der Richtung wechselnden Eigenschaften von Kristallen kann in oft überraschender Weise mittels optischer Erscheinungen gegeben werden. Es sei zur Kennzeichnung dafür auf einen leicht anzustellenden Versuch am Epidot hingewiesen, aus dessen Kristallen sich durch Spaltung nach ihrer Längsrichtung Stäbchen herstellen lassen, die von zwei Paar parallelen Flächen begrenzt sind. Beim Gang des Tageslichtes durch das eine Flächenpaar erkennt man einen bräunlichen Farbenton, während der Durchblick durch das zweite Paar ganz anders gemischtes, nämlich grünliches Licht liefert.

Ebensoleicht läßt sich eine Verschiedenheit thermischer Eigenschaften mit der Richtung an vielen Kristallen erkennen. Recht geeignet zur Erläuterung sind dafür Spaltblättchen von Gips, die mit einer zarten Wachsschicht überzogen sind. Führt man einen Draht durch ein ihm eng angepaßtes Loch der Gipsplatte und läßt durch ihn Wärme zuströmen, so zeigt sich ihre Fortleitung im Kristall durch Schmelzen des auf seiner Oberfläche sitzenden Waxes an. Unverkennbar ist der Schmelzhof nicht kreisförmig (was gleich schnelle Fortleitung der Wärme in der Ebene der Gipsspaltfläche bedeuten würde), sondern elliptisch. Die Längsachse der Schmelzfigur entspricht der Richtung größter, die kleine Achse derjenigen kleinster Fortleitungsgeschwindigkeit der Wärme. Bei Versuchen an verschiedenen Stellen der Platte erweist sich die Längs- und Querrichtung der Schmelzhöfe parallel.

Weiter noch möge zur Erläuterung des regelmäßigen Wechsels von physikalischen Eigenschaften der Kristalle die Ungleichmäßigkeit der Wärmeausdehnung angeführt werden, die sich bei bestimmten Kristallgruppen durch feine Messungen beobachten läßt. Eine aus dem Quarz der Fig. 1 gedrehte Kugel wandelt sich beim Erwärmen um in ein Rotationsellipsoid mit Ausmaßen, die der Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten parallel und senkrecht zur Vertikalrichtung des Kristalls der Fig. 1 von  $\alpha = 0,00000781$  und  $\alpha' = 0,00001419$  entsprechen. Eine Kalkspatkugel mit  $\alpha = 0,00002621$  und  $\alpha' = -0,00000540$  andererseits würde beim Erwärmen durch Ausdehnung in Richtung der Vertikalachse des Kristalls und durch gleichzeitiges Zusammenziehen in allen Richtungen senkrecht dazu ein verlängertes Rotationsellipsoid geben, eine Epidotkugel ein dreiachsiges Ellipsoid.

Wechsel der  
chemischen und  
der Wachstums-  
sowie Auf-  
lösungsverhält-  
nisse mit der  
Richtung.

Selbst in chemischer Hinsicht läßt sich ein gesetzmäßiger Wechsel der Eigenschaften kristalliner Materie mit der Richtung nicht verkennen. So kann man beim Kalkspat eine ungleiche Intensität der chemischen Umsetzung  $\text{CaCO}_3 + 2 \text{HCl} = \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$  durch die verschiedene Menge von Kohlendioxyd nachweisen, die sich unter gleichen Umständen auf den Flächen des Minerals entwickelt. Die Angreifbarkeit des Kalkspates durch Salzsäure wechselt also mit der Richtung. Ein gleiches zeigt der Quarz. Nach O. Mügge ist die Zersetzungsgeschwindigkeit durch Flußsäure bei diesem Mineral auf Platten, die horizontal aus einem Kristall der Fig. 1 herausgeschnitten sind, 150mal größer als auf solchen parallel einer Säulenfläche. Die Lösungsgeschwindigkeit von Gips in Wasser wechselt nach St. Tolloczko auf drei untersuchten Flächen im Verhältnis von 1 : 1,76 : 1,88. R. Schenk fand an Alaunkristallen, daß die Ebenen des Oktaeders, Würfels und Rhombendodekaeders bei 35° Wasser im Verhältnis 1 : 1,27 : 1,60, also in recht verschiedenem Maße, abgeben. Säuren lassen nach F. Cornu die Säulenflächen von Apophyllit noch unangegriffen wenn auf den Pyramiden und der Basis des Minerals bereits starke Zerstörung unter Ausscheidung von Kieselgallerte stattgefunden hat.

Mit dieser Richtungsverschiedenheit der Auflösungsgeschwindigkeit hängt es zusammen, daß eine Kalkspatkugel in Salzsäure und eine Quarzkugel in Flußsäure sich nicht etwa konform verkleinern, daß sich vielmehr aus ihnen ziemlich regelmäßig mit Flächen und Kanten versehene Körper herausbilden. Entsprechend bleibt eine in angesäuertes Wasser gelegte kreisrunde Gipsscheibe beim Auflösen nicht kreisförmig, sie formt sich vielmehr zu einem rundlich-viereckigen Präparat um.

Ebensowenig behält ein Kristallsphäroid, das in ein Wachstumsmittel gelegt wird, etwa eine in übersättigte Alaunlösung gelegte Alaunkugel, seine Form; es wächst nicht durch konzentrischen gleichmäßigen Absatz zu einer größeren Kugel, sondern in regelmäßiger Art mit der Richtung sprungweise wechselnd zu einem Kristall mit ebenen Flächen und zwar zu einem Oktaeder aus, wie A. Rauber zeigte.

Deutlichst läßt sich in allen angeführten Fällen erkennen, daß die physikalischen und die chemischen Eigenschaften kristalliner Materie, soweit es die zur Verfügung stehenden Untersuchungsarten festzustellen gestatten, auf allen parallel gerichteten Graden gleich sind, daß sie aber in davon abweichenden Richtungen andere sein können.

Heteropolarität.

Es vermag sich aber auch ein ganz besonderer Fall des Wechsels der Eigenschaften mit der Richtung zu verwirklichen, und zwar sowohl geometrisch und physikalisch als auch chemisch, der nämlich, daß Richtung und Gegenrichtung im Qualitätswechsel sich ausdrücken. Gestaltlich offenbart sich das im Mangel von parallelen gleichberechtigten Gegenflächen zu Kristallflächen, was bezüglich aller Ebenen z. B. beim Tetraeder zu erkennen ist. Physikalische Analoga dieser Heteropolarität bekunden sich gelegentlich leicht hinsichtlich der bei manchen Kristallen sehr ausgeprägten Pyroelektrizität; sie zeigt sich z. B. am Turmalin, der bei Veränderung seiner Temperatur an den Enden der säulig



gestalteten Kristalle entgegengesetzt elektrisch wird. Beim Skolezit kann man entsprechende pyroelektrische Umstände nachweisen und dazu in chemischer Hinsicht ganz leicht erkennen, daß die Angriffsweise von Säuren auf bestimmten Flächen und ihren parallelen Gegenflächen verschieden ist. Es zeigt sich nämlich an einer geätzten Skolezitspaltplatte, daß ihre eine Seite mikroskopisch regelmäßige Auflösungserscheinungen (sog. Ätzfiguren) aufweist, die von denen auf der parallelen Gegenfläche völlig verschieden sind, ein Zeichen der Heteropolarität in den beiden Richtungen senkrecht zur Untersuchungsfläche: Verschiedenheiten wie, bildlich, bergauf und bergab, mit dem Wind und gegen den Wind.

Wenn es sich hiernach im Überblick des Erörterten klar heraushebt, daß die kristalline Materie mit der Richtung gesetzmäßig wechselnde Eigenschaften besitzt, so sei zur richtigen Kennzeichnung der Umstände nicht verfehlt zu bemerken, daß in der Hinsicht natürlich nicht alle Eigenschaften in Betracht kommen. Selbstverständlich fallen hier die aus, welche ihrer Natur nach keine Richtungsverschiedenheiten zeigen, wie die „skalaren“ Umstände des spezifischen Gewichts und der Temperatur, deren vollständiges Kennzeichen lediglich in einem Zahlenwert liegt, im Gegensatz zu den „vektoriellen“ Eigenschaften, die sich durch Zahlenwerte und einseitige Richtung bekunden. Auch möchte schon hier vermerkt werden, daß die Kristallwelt sich nach ihren vektoriellen Qualitäten in Gruppen teilen läßt, bei denen immer nur bestimmte Eigenschaften Richtungsverschiedenheiten zeigen. Über die Gesetze in dieser Hinsicht wird später die Rede sein. Bereits liegt aber dem Leser die wichtige Erfahrungstatsache klar vor, daß die Wachstums- und die Lösungsformen sowie die Spaltgestalt, also daß die geometrischen Verhältnisse der Kristalle stets die Richtungsverschiedenheiten aufweisen, insofern ja bestimmte ebene Flächen die Kristall- und die Spaltform sprungweise umschließen. Dieser Umstand der Kristalle, in ihrer äußeren Form und ihren Kohäsionsverhältnissen diskontinuierlich zu wechseln, erscheint besonders charakteristisch. Über die Besonderheiten der flüssigen Kristalle in der Hinsicht soll weiterhin berichtet werden.

Schließlich mag betont werden, daß das Kennzeichen kristalliner Materie, auf parallelen und gleichgerichteten Graden gleiche, auf davon abweichenden andere Eigenschaften zu besitzen, in seiner Bedeutung nicht verringert wird durch den Umstand, daß gelegentlich Kristalle sich zufolge von ursprünglichen oder nachträglichen Krümmungen dieser Forderung nicht fügen. Dann handelt es sich lediglich um Abnormitäten, die unter dem Einfluß eines Zwanges entstanden sind, um Fälle, welche die Richtigkeit und Wichtigkeit der auf das Normale bezogenen Definition nicht schwerwiegend genug beeinträchtigen, daß sie aufgegeben werden müßte. Auch ist selbstverständlich, daß Homogenität kristalliner Materie nur besteht, wenn sie in allen ihren Teilen gleichmäßige Temperatur besitzt und rundum unter gleichmäßigem Drucke steht.

III. Sinnbilder des Kristallinen. Die Betrachtung der regelmäßigen äußeren Erscheinung der Kristalle führte zur Vorstellung ihres Aufbaues aus

Beschränkung  
des Eigenschafts-  
wechsels.

Abnorme Ver-  
hältnisse.

kleinsten gesetzmäßig angeordneten Teilen. Schon Chr. Huygens (1629—1695) konstruierte sich im Verfolg dieses Gedankens aus Haufen von Sphäroiden Strukturbilder des Kalkspates, vor allem aber haben sich Haüy, Frankenheim, Bravais, Sohncke, Groth, Schönflies, Barlow, Sommerfeldt, Fedorow, Beckenkamp mit Erfolg bemüht, das Gefüge der Kristalle sinnbildlich darzustellen. Ihr Ziel war nicht nur, durch Schemata die geometrischen Verhältnisse zu symbolisieren, sondern die erdachte Tektonik des Molekelhaufens zur Grundlage von Schlußfolgerungen zu machen, möglichst bezüglich aller Eigenschaften der Kristalle: ein hohes, noch fernes Ziel.

Theorie von  
Haüy.

René Just Haüy (1743—1822) erkannte bei der Mannigfaltigkeit der Gestalten, die dasselbe Mineral aufweisen kann, und bei der Konstanz, die ihm bezüglich der Spaltgestalt innewohnt, in dieser einen deutlichen Hinweis auf die Architektur der Kristalle. Seine ersten Beobachtungen in der Hinsicht be-

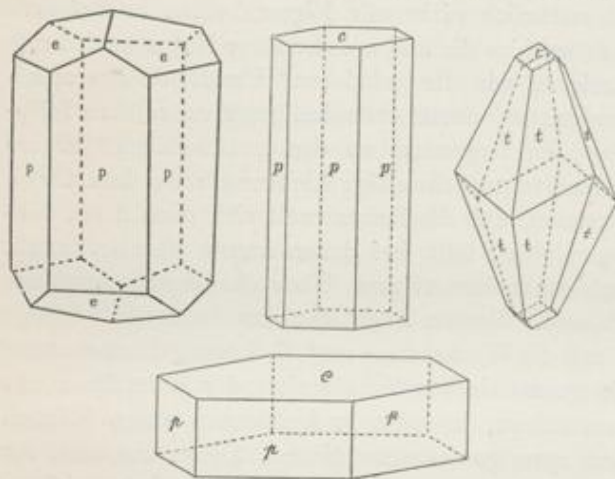


Fig. 2. Wechselnde Kristalltracht des Kalkspats.

trafen, wie die Huygens, den Kalkspat, der, ein Proteus im Mineralreich, in außerordentlichem Wechsel der Gestalt erscheint, bald als regelmäßige sechsseitige Tafel mit zu ihr senkrechten Randflächen, bald als Säule mit gerader Querabstumpfung, bald als Rhomboeder, bald in noch anderen verwickelteren Formen, und der dennoch, gewissermaßen durch anatomische Zerlegung, nämlich mittels der Spaltung, in lauter

Rhomboeder bestimmter Abmessung zerteilt werden kann. Diese bei äußerster Zergliederung aus jeder Form des Kalkspates immer wieder sich ergebende Spaltform des Minerals sah Haüy als dessen Kerngestalt, als „molécule intégrante“, an. Bei anderen Stoffen führte ihn die Spaltung auf den Würfel als Kern, bei wieder anderen auf ein Parallelepipedon mit ungleichen Seiten usw. Die ganze Mannigfaltigkeit dieser Kerngestalten ließ sich auf drei Typen, nämlich Tetraeder, dreiseitiges Prisma und Parallelepipeda zurückführen. Es kam nun darauf an, aus diesen integrierenden Gestalten die Fülle der gesetzmäßigen Kristallformen zu entwickeln. Dem scharfsinnigen Gelehrten gelang dies in höchst anschaulicher Weise durch treppenförmige Auflagerung von Kerngestaltsschichten auf einen Ausgangskern, wie es die nach Haüy's Original hergestellte Figur 3 versinnbildlicht. Durch solche „Dekreszenz“ konnte Haüy sich aus dem Würfel das Rhombendodekaeder ableiten, ein Skalenoeder aus Rhomboedern aufbauen und dergleichen mehr. Natürlich ist

diese Schichtung der Kristalle äußerst zart submikroskopisch fein zu denken, so daß selbst für unseren instrumentell auf das Äußerste verschärften Gesichtssinn die Treppenform der Kristallflächen verschwindet.

Mit gutem Grunde wird diese Haüysche Vorstellung, in welcher die später zu besprechenden Grundgesetze der Kristallographie bereits eingeschlossen sind, noch jetzt als ein ausgezeichnetes erstes Sinnbild des Kristallbaues geschätzt, und in vollem Recht umgibt den Namen des Abbé Haüy der Ruhm des Begründers der geometrischen Kristallographie. Zwar läßt sich nicht verkennen, daß die Hypothese der Kerngestalten ihre physikalische Grundlage bei nicht spaltenden Kristallen verliert, auch konnte die neuere Auffassung der Materie den Gedanken einer lücken-

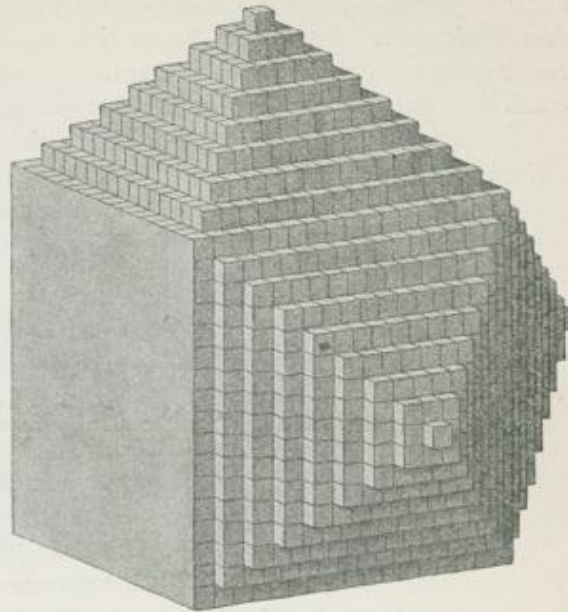


Fig. 3. Beispiel einer Haüyschen Dekreszenz.

losen Raumerfüllung, wie er sich in den Haüyschen Vorstellungen verkörpert, überhaupt nicht zu Recht bestehen lassen. Schon die Zusammendrückbarkeit der festen Körper spricht dagegen. So nahm und nimmt man denn, wie bei Flüssigkeiten und Gasen, auch für die festen Stoffe schwebende Moleküle an. Bei Kristallen halten sie sich in regelmäßiger Ordnung. Die Raumgitter A. Bravais' (1811—1863) werden dem gerecht. Fig. 4 stellt ein Beispiel dar. Die Punkte des Sinnbildes kann man sich als die Zentren der Bewegung kleinster Teile denken; sie liegen einander so außerordentlich nahe, daß kein Mikroskop zuläng, die inhomogene Bauweise aufzudecken, die nach dieser Vorstellung doch insofern vorhanden ist, als Teilchen mit Zwischenräumen wechseln; im physikalischen Verhalten werden an ungestörten Kristallen weder qualitative noch quantitative Verschiedenheiten in derselben Richtung gefunden.

Charakteristisch ist, daß in jedem Punkte des endlos aufgefaßten Kristallraumgitters die Verteilung der Nachbarpunkte gleich ist. Beim Fortschreiten auf einer geraden Linie (Netzlinie) wiederholen sich die angetroffenen Partikel in gleicher Periode und zwar nicht nur wenn man benachbarte Teilchen verknüpft, sondern auf beliebigen Verbindungsstrecken. Entsprechendes gilt für die Ebenen (Netzebenen), welche man durch je drei nicht auf einer Geraden

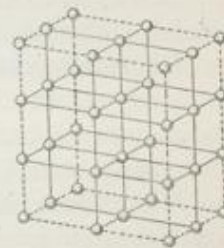


Fig. 4. Beispiel eines Bravais'schen Raumgitters.

Theorie von Bravais.

befindliche Punkte legt, und vervollständigt man solch ein Dreieck durch Verknüpfung eines der drei Punkte mit dem geeigneten vierten zu einem Parallelogramm, so erscheint die endlos gedachte Fläche der vier Punkte durch Parallelogramme gebildet, die unter sich und mit den aller parallelen Ebenen übereinstimmen. Schließlich lassen sich die Raumgitter durch Verknüpfung von Punkten auch in beliebige Parallelepipeda zerlegen, die in dem ganzen durch das Raumgitter dargestellten Körper gleich sind.

Derartige Vorstellungen kann man ersichtlich an die Sinnbilder Haüy's leicht anknüpfen; es ist nur nötig, an Stelle der lückenlos aneinander gefügten Haüy'schen Kerne deren Schwerpunkte zu setzen. Bereits L. A. Seeber (1824) und G. Delafosse (1843) wiesen auf solche Ummodelungen der Haüy'schen Symbole der Kristallstruktur hin.

Recht interessant ist es nun, Beziehungen ausfindig zu machen zwischen dem Wesen dieser Raumgitter und der Umgrenzung der Kristalle durch ebene Flächen. Man wird ohne weiteres annehmen dürfen, daß die Kristallflächen Netzebenen entsprechen und zwar wird wohl jede beliebige Netzebene als Kristallumgrenzung erscheinen können; es ist aber auch recht einleuchtend, daß im allgemeinen die Ebenen größter Netzdichte in der Hinsicht bevorzugt, also als Kristallflächen besonders häufig sein werden.

Die nähere Überlegung zeigt allerdings, daß die Verhältnisse doch wohl nicht so einfach liegen können. Das erhellt schon aus dem Wechsel der Kristallform je nach den Kristallisationsumständen des Stoffes. Kochsalz sondert sich aus seiner reinen wäßrigen Lösung in Würfeln ab, aus stark mit Harnstoff versetzter Lauge in Oktaedern. Das Gewand der Kristalle ist also beim Chlor-natrium nicht konstant, obwohl die Ebenen größter Netzdichte sich mit den Lösungen doch wohl nicht verändert haben. Man müßte also zur Wahrung der erwähnten Vorstellung schon den Spielraum setzen, daß eine von den Formen sich bildet, deren Netzdichte recht groß ist; beim kubischen Raumgitter z. B. Würfel, Oktaeder oder Rhombendodekaeder.

Ein Heranziehen der beim Lösungsvorgange entstehenden Körper in die Betrachtung macht die Sachlage noch schwieriger. So findet man beim Steinsalz als Hauptwachstumsformen den Würfel und das Oktaeder, als Lösungskörper aber ganz andere Gestalten, nämlich Pyramidenwürfel und Ikositetraeder.

Mit größerer Sicherheit läßt sich ein Zusammenfallen der durch bedeutendste Netzdichte ausgezeichneten Ebenen des Bravais'schen Raumgitters mit den sich immer gleich bleibenden Spaltflächen im Kristall verteidigen; sie sind offenbar Ebenen senkrecht zu denen der Zusammenhalt der kleinsten Teile ein Minimum besitzt. In der Hinsicht ist es interessant zu sehen, daß die Flächen größter Netzdichte am weitesten von allen Parallelebenen eines Raumgitters voneinander abstehen; Netzdichte und der Abstand der Parallelebenen sind umgekehrt proportional.

Was nun die Arten der Raumgitter anlangt, so konnte A. Bravais auf Grund mathematischer Überlegungen zeigen, daß deren 14 möglich sind, die sieben Grade der Symmetrie besitzen. Diese Stufen kennzeichnen die sogenannten

Systeme der Kristallwelt: das triklone, monokline, orthotrimetrische, trigonale, tetragonale, hexagonale und isometrische, von denen später genauer die Rede sein wird. Hier ist es von Wichtigkeit zu vermerken, daß damit aber noch nicht die Mannigfaltigkeit der geometrischen Symmetrie der Kristalle erschöpft wird; denn im ganzen hat man es in der Hinsicht nicht mit sieben, sondern mit weit mehr, nämlich 32 Kristallklassen zu tun.

So war es also, um die Gesamtheit der Kristallwelt symbolisieren zu können, strukturtheoretisch nötig, die Auffassung zu weiten. Bravais versuchte dem gerecht zu werden, indem er den zum Raumgitter stets parallel angeordneten Molekeln eine gewisse Form, also eine bestimmte Symmetrie zuschrieb. Bei sieben Abteilungen würde nach ihm die Symmetrie der Molekel gleich der der ganzen Raumgitterform sein; die übrigen 25 Gruppen wären durch die nämlichen Raumgitterarten darzustellen, in denen aber Molekel mit einer Symmetrie niederer Art zu denken wären, als sie die ersten sieben Kristallklassen besitzen. Die höhere Symmetrie in der Anordnung der Raumgitterpunkte käme dann in der des Ganzen nicht mehr zur Geltung, diese würde vielmehr auf die der Molekeln heruntergedrückt.

J. Beckenkamp, der viele genaue Untersuchungen und scharfsinnige Erörterungen über den Bau von Kristallen anstellte, meint gleichfalls, daß die Schwerpunkte der Kristallmoleküle in der Symmetriestellung der sieben Bravais'schen Gruppen angeordnet sind. Die Moleküle selbst besitzen nach ihm einen tiefen Symmetriegrad; sie können sich aber zwillingsmäßig vereinigen und im Rahmen einer Hauptgruppe verschiedene Symmetrien zuwege bringen.

Es ist nicht zu verkennen, daß die Bravaissche und ihr verwandte Auffassungen, wonach ein Kristall, mit V. Goldschmidt zu sprechen, ein festes System gleicher gleichgerichteter Partikel ist, den großen Vorteil der Einfachheit besitzen. Die Annahme von sieben Hauptgruppen und von diesen jeweils abzuleitenden niedriger symmetrischen Abteilungen ist gewiß nach dem Sinne vieler Kristallographen. Manche aber empfanden den Parallelismus der Molekel, den die Bravaisschen Vorstellungen vom Raumgitter im Kristallgebäude voraussetzen, als einen im allgemeinen unnötigen Zwang und hielten ihn insbesondere für unvereinbar mit einer recht wichtigen physikalischen Eigenschaft gewisser Kristalle, der Zirkularpolarisation. Es handelt sich dabei um die Drehung der Schwingungsebene linear polarisierten Lichtes, welches die betreffenden kristallinen Medien durchdringt, um einen Vorgang, den man am ehesten durch spiralige, also nicht parallele Anordnung der Moleküle zu erklären meint.

So hat denn L. Sohncke (1842—1897) vom ganz allgemeinen Standpunkte aus, nur unter der Voraussetzung des Chr. Wiener'schen Prinzips, daß jedes Teilchen von den übrigen gleich umgeben sei, alle Strukturformen aufgesucht, bei denen die Symmetrie nur von der Anordnung der Moleküle abhängt, nicht von ihrer Form. Das Ergebnis waren 65 regelmäßige Punktsysteme, die sich im allgemeinen als ineinander gestellte Raumgitter kennzeichnen.

Theorie von  
Sohncke und  
Groth.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß durch diese Annahme gesetzmäßiger Ineinandergruppierung auch schraubenförmige Anordnungen zuwege gebracht werden können, bei denen sich weiterhin der bekannte Unterschied der Links- und Rechtsdrehung durch linken oder rechten Wendeltreppenaufbau leicht versinnbildlichen läßt. Andererseits erwiesen sich diese 65 Punktsysteme immer noch nicht ausreichend zur Erklärung sämtlicher 32 Kristallgruppen, so daß eine Erweiterung der ersten Sohnckeschen Ableitung nötig war. Das erwünschte Ziel wurde erreicht durch die Annahme von ineinandergestellten Punktsystemen aus Teilchen, die in den verschiedenen Punktsystemen nicht kongruent, sondern nur spiegelbildlich gleich oder chemisch verschieden sind. Von P. v. Groth, der an der Entwicklung der Sohnckeschen Ideen reichen Anteil hat, sind diese Gedanken weiter gesponnen. Die Atome selbst wurden als Erbauer ineinandergestellter regelmäßiger Punktsysteme angenommen. Bei Elementen würde es sich also nur um ein Punktsystem handeln; bei Verbindungen wären es so viele als Elemente das chemische Molekül aufbauen.

Experimentelle  
Untersuchungen  
über Kristall-  
strukturen.

Beim Überblick all dieser mannigfachen Vorstellungen von der Struktur kristalliner Materie drängt sich natürlich der Wunsch auf, die Natur selber durch das Experiment zu befragen und zu versuchen, von ihr Bescheid darüber zu erhalten, ob das angenommene feine Maschengefüge der Kristalle in Wirklichkeit besteht. Eine solche Anfrage wurde mit in der Tat glücklichem Erfolge durch Experimente von M. Laue, W. Friedrich und P. Knipping gestellt, die den Durchgang der so außerordentlich kleinwelligen also molekularen Verhältnissen angepaßten Röntgenstrahlen durch Kristallplatten verfolgten. Die erst kürzlich veröffentlichten Ergebnisse ihrer Versuche erscheinen von fundamentaler Bedeutung. Es zeigten sich auf photographischen Platten, die von Röntgenstrahlen nach dem Durchgange durch Kupfervitriol, Zinkblende und andere kristalline Stoffe getroffen waren, ausgezeichnet regelmäßige, mit der Richtung, in welcher das Licht die Kristalle durchsetzte, wechselnde Beugungsbilder;

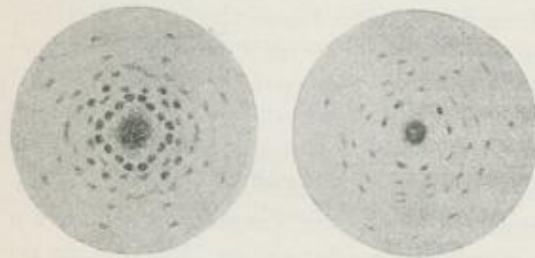


Fig. 5.

Beugungsbilder von Röntgenstrahlen, die Zinkblendeplatten durchsetzten. (Nach Friedrich und Knipping.)

Fig. 5 gibt einige davon wieder. Man wird dies Ergebnis als einen neuen und recht sinnfälligen Beweis dafür ansehen können, daß die Moleküle bestehen und nicht bloße Produkte naturwissenschaftlich-philosophischer Phantasie sind. In kristallographischer Hinsicht ist höchst bedeutsam, daß die Symmetrie der Zinkblendebeugungsbilder der des betreffenden Bravais'schen Raum-

gitters entspricht; die niedere Symmetrie seiner hemiedrischen Klasse innerhalb der isometrischen Hauptgruppe kommt bei dem Mineral nicht zur Geltung, wohl ein Fingerzeig dafür, daß Auffassungen, wie sie Bravais und Beckenkamp entwickelt haben, am ehesten der Wirklichkeit angepaßt sind.

Welche Kräfte den Mikrokosmos der kristallinen Körper bedingen, die also verhindern, daß die kleinsten Teile wirt durcheinander laufen, vielmehr sie Ursache der Kristallstruktur. in Bewegungen um bestimmte regelmäßig angeordnete Zentren bannen, das harrt als großes Rätsel noch der Beantwortung. Recht interessant ist in der Hinsicht die Ansicht Beckenkamps, der von den Atomen ausgehende Interferenz erzeugende Strahlen voraussetzt; sie sind nach ihm in den Netzlinsen der Krystallstruktur stehende, so daß die kleinsten Teile in regelmäßige Gruppierung von Raumgittern gezwungen werden. Danach wäre die Kristallisation in erster Linie nicht auf statische, sondern auf kinetische Vorgänge zurückzuführen. Allerdings könnte man im Verfolg dieser Vorstellung mit V. M. Goldschmidt zu der Schlußfolgerung kommen, daß bei niedrigen Temperaturen, nämlich sobald der Wärmehalt eines Kristalls gleich Null geworden ist, die ordnende Strahlung verklingt und die vorher in regelmäßigste Gruppierung gebannten Molekel zu einem wirren Haufen auseinander fallen müssen, was nicht beobachtet wird; der Diamant hat nach W. Nernst im Temperaturbereich von  $-227^{\circ}$  abwärts die spezifische Wärme Null, und dennoch bleibt sein Kristallgefüge bestehen. Dieser Einwendung begegnet Beckenkamp durch die Voraussetzung, daß die ordnende Strahlung nicht kalorischer Art sei, vielmehr eine Wellenlänge von noch viel geringerer Größenordnung besitze als das Licht, und da die als absoluter Nullpunkt bezeichnete Temperatur sich nur auf die kalorisch wirksamen Strahlen bezieht, so liege keine Veranlassung vor, einen Zerfall des Kristallgebäudes in der Nähe dieses Wärmegrades anzunehmen.

IV. Das Wesen amorpher Materie. Amorphe feste Körper, wie etwa Kein Eigenschaftswechsel mit der Richtung. Opal, haben in allen Richtungen gleiche Eigenschaften; sie sind pansymmetrisch. Daher fehlt ihnen der Schmuck regelmäßig angeordneter ebener Flächen. Ihr geometrisches Symbol ist die Kugel und wie im gestaltlichen, so gilt dies Sinnbild für die amorphen Stoffe mit der Gleichheit seiner Radien auch im physikalischen und chemischen Sinne. Es fehlen dem Opal wie allen anderen amorphen Körpern Spaltebenen. Die Geschwindigkeit des Lichtes und der Wärmeausbreitung wechseln in ihnen durchaus nicht mit der Richtung. Beim Erhitzen einer amorphen Kugel ändert sie zwar ihren Durchmesser, aber nicht ihre allgemeine Gestalt. Eine elektrische Erregung durch Temperaturänderung nach Art der Pyroelektrizität gewisser Kristalle findet bei amorphen Stoffen nie statt. Chemische Vorgänge werden bei ihnen durch die Richtung, in der sie voranschreiten, nicht beeinflusst. In Summa: amorphe Körper sind in jeder Hinsicht isotrop.

Es ist nicht leicht, sich von ihrem inneren Wesen eine Vorstellung zu machen. Eine Struktur nach Art der Punktsysteme kann man dem Amorphen nicht zuschreiben. Vielleicht wird seine Eigenart am besten durch den hübschen Vergleich erhellt, den W. Voigt in seiner Kristallphysik gibt: Man denke sich einen Saal mit einigen hundert ausgezeichneten Musikern, die mit tadellos gestimmten Violinen dasselbe Stück spielen, es aber — an verschiedenen Stellen begonnen haben. Dann ist der Effekt unerfreulich, wirt, ein trübes Gemisch von Tönen. Eine solche Musik machen die Moleküle im gasförmig, flüssig

und fest amorphen Zustände; sie geben nur monotone Mittelwerte. Das Kristalline hingegen läßt sich einem Orchester unter einem tüchtigen Dirigenten vergleichen. Alle Hände führen den gleichen Strich, Melodie und Rhythmus treten heraus.

Umwandlung  
des Kristallinen  
und Amorphen  
ineinander.

Im Sinne dieses Gleichnisses ist es von Bedeutung, daß kristalline Stoffe in amorphe übergeführt werden können, und daß die Größe individueller Freiheit, welche den Teilchen nach der Umwandlung zukommt, sich durch einen bedeutenderen Energieinhalt gegenüber dem kristallinen Zustande kennzeichnet. Die Wärmetönung des Schmelzvorganges zeigt, daß beim Vernichten der Kristallstruktur Energie verbraucht wird: ein in die Kristallmasse gestecktes Thermometer steigt beim Erwärmen des Präparats allmählich an bis zum Umwandlungspunkte der Amorphosierung, wo es trotz weiterer Wärmezufuhr stehen bleibt, zum Zeichen, daß hier ein Diskontinuitätspunkt erreicht ist und alle zugeführte Energie verzehrt wird zwecks Umwandlung des Kristallinen in Amorphes. Beim Rücklauf der Temperatur wird die gebundene Wärme wieder frei falls die Teilchen sich zu Kristallen zusammenfinden. Ist das zufolge allzu schneller Abkühlung nicht der Fall, so verbleibt dem Stoffe der Energieschatz, der beim Kristallisieren frei geworden wäre. Beim etwaigen nachträglichen Kristallinwerden kommt er zum Vorschein, wie man es recht drastisch beim glasig erstarrten Natriumsilikat erläutern kann, das durch einen kleinen Anstoß, mittels Erhitzen, schnell kristallin wird und nunmehr in seiner „Kristallisationswärme“ erglüht.

Beim Übergang des Kristallinen ins Amorphe werden sich alle Eigenschaften diskontinuierlich ändern. So findet man es bezüglich des Volumens und der Lichtgeschwindigkeit. Etwaige optische Anisotropie schlägt plötzlich in einfache Brechung um. Die Größe des Sprunges kann aber bei verschiedenen Qualitäten an Stärke sehr wechseln und in gewissen Eigenschaften äußerst gering sein. In der Hinsicht ist es von besonderem Interesse die Erweichung der Stoffe beim Übergang kristallin → amorph zu studieren. Zumeist ist sie recht auffallend: die Kristalle „schmelzen“ beim Amorphosierungspunkte rasch d. h. die Substanz wird plötzlich flüssig, wie es z. B. Blei, Antimonglanz u. a. zeigen. Bei manchen Kristallen ist dieser Viskositätswechsel aber ganz unauffällig. So findet man es bei den Feldspaten, beim Spodumen und Quarz; die Starrheit vor und nach der Umwandlung ist bei ihnen nicht merklich verschieden. Beim Übergang ins Amorphe biegen sich nur an den Enden unterstützte Feldspatstäbchen nicht einmal durch, erst beim Erhitzen weit über den Umwandlungspunkt hinaus, also im bereits amorphen Zustande, werden sie allmählich weicher, bis schließlich Verflüssigung eintritt. Beim Siliciumdioxid z. B. liegt der Umwandlungspunkt kristallin → amorph bei 1450°, flüssig ist das bei dieser Temperatur entstandene Glas aber erst bei etwa 1600°. Für die Bestimmung des Amorphosierungspunktes ist es demnach nicht allgemein angängig, auf die Zeichen des Erweichens sich zu verlassen. Es ist ja auch bekannt, daß manche Kristalle schon vor der Amorphosierung recht weich sind, so das reine Eisen, und fernerhin daß gewisse Kristalle schon bei gewöhnlicher Temperatur



flüssiger sind als Wasser. Über diese und verwandte merkwürdige Umstände wird im folgenden Kapitel besonders verhandelt.

Hier, beim Vergleich des Amorphen mit dem Kristallinen, sei noch die gewiß interessante Frage beantwortet, ob ersteres mit dem letzteren die Eigenschaft des Wachsens teilt. Es ist diese bei Kristallen so leicht und in zierlichster Erscheinung unter dem Mikroskop zu beobachtende Fähigkeit dem Amorphen oft abgesprochen worden, aber gewiß ohne Grund. Mit Recht weist K. Schaum darauf hin, daß doch auch Gasblasen oder Flüssigkeitstropfen in ihren übersättigten Lösungen an Größe zunehmen und daß kein physikalisches Moment zugunsten der Annahme vorliegt, eine amorphe Substanz wie etwa Opal verhalte sich anders. Der Aggregatzustand ist für den Vorgang des Wachstums nicht von grundlegender Bedeutung. Wohl aber ist die Art des Wachstums bei Amorphen von der bei Kristallinen verschieden: sind dort alle Richtungen gleich, so tritt hier das Charakteristikum des Kristallinen, sich mit der Richtung gesetzmäßig verschieden zu verhalten, heraus.

Wachsen amorpher Stoffe.

V. Weiche, quellende und flüssige Kristalle. Bei der Definition des Begriffes Kristall war vom Aggregatzustande nicht die Rede. Es wurden stillschweigend „feste“ Körper angenommen. Nun ist aber jedem bekannt, daß mancherlei Abstufungen der Festigkeit bei kristallinen Stoffen vorkommen, wie die Beispielsreihe Bergkristall, Steinsalz, Blei, Talk, Schmierseife (die auch aus Kristallen besteht) erkennen läßt und wie man es am selben Körper, z. B. dem Steinsalz, bei niederer und höherer Temperatur beobachten kann. Rotglühendes Steinsalz und weißglühendes reines Eisen sind schon sehr weich und dennoch kristallin; sie können sich auch bei solch hohen Temperaturen in entsprechender Weichheit in Kristallen bilden.

Stufenfolge der Festigkeit von Kristallen.

Manche Stoffe lassen sich durch Aufnahme von Flüssigkeit ohne Verlust der Homogenität erweichen, so die quellbaren Kristalle von Carbonmonoxyd-Hämoglobin, Eiweißkristalle und basisches Zirkonoxalat; letzteres erweicht immer mehr, je mehr Wasser aufgenommen wird, und schließlich ist es durchaus flüssig, ebenso Hämoglobin und Edestin, die im trockenen Zustande spröde und hart sind, nach der Wasseraufnahme aber zusammenbacken.

Quellbare Kristalle.

A. F. W. Schimper (1878) verdankt man eine nähere kristallographische Untersuchung der von Th. Hartig (1856) entdeckten merkwürdigen Eiweißkristalle, wie sie sich im Gewebe von Pflanzen, auch als Dotterblättchen in Eiern von Tieren finden. Es sind oft modellartig scharfkantige Gebilde. Beim Aufquellen bleiben sie ganz regelmäßig in der Form; die isometrischen unter ihnen vergrößern sich nach allen Seiten gleichmäßig, die übrigen in gesetzmäßiger Verschiedenheit mit der Richtung. So ist es z. B. bei den rhomboedrigen Kristallen von Musa Hillii die sich beim Quellvorgange in der vertikalen Richtung um das Vierfache, in der horizontalen um das Zwei- bis Dreifache verlängern. Dabei giebt es natürlich charakteristische Winkeländerungen, etwa eine Abnahme der Kantenneigungen in einer Rhomboederfläche von  $90^\circ$  auf  $68^\circ$ . Die Vorgänge sind umkehrbar, falls keine chemische Zerstörung beim Quellen statthat.

Es handelt sich ersichtlich in solchen Fällen um homogene Deformationen des Kristallgebäudes, und zwar um eine gesetzmäßige Erweiterung und ein Wiedereinschrumpfen der Molekelabstände in sehr bedeutenden Dimensionen. Gerade dieses gewaltige Maß ist es, welches den Vorgang überraschend erscheinen läßt. Qualitativ entspricht er den bekannten Gestaltsänderungen, welche jede Kristallstruktur durch Erwärmen bzw. Abkühlen oder durch molekulare Aufnahme sogenannter isomorpher Stoffe erfährt. Im übrigen brachte J. R. Katz den interessanten Nachweis, daß sich bei quellenden Kristallen bezüglich Dampfdruck, Wärmetönung und Volumkontraktion ganz ähnliche Kurven aufstellen lassen wie bei flüssigen Mischungen. Wie diese so sind die quellbaren Kristalle Lösungen. Dabei erinnern die Eiweißkristalle durch eine Schichtung aus wasserärmeren und -reicheren Schalen, sowie durch zelligen Bau innerhalb der Lagen an organische Substanzen von der Art der Stärkekörner.

Flüssige Kristalle.

Bezüglich der weichen und flüssigen Kristalle kommen vor allem Untersuchungen von O. Lehmann in Betracht, der, nachdem F. Reinitzer (1888) bereits auf das merkwürdige Verhalten des hierher gehörigen Cholesterylbenzoats aufmerksam geworden war, mit allergrößter Beharrlichkeit den wissenschaftlich in der Tat höchst lohnenden Fall der flüssigen Kristalle untersucht hat. Ein durch ihn klassisch gewordenes Beispiel ist das Ammonoleat, dessen mit verrundeten Flächen versehene Individuen äußerst weich sind, und die bei gegenseitiger Berührung, wie sich Flüssigkeitstropfen zu einer Kugel vereinigen, zu einem entsprechend größeren, spindelförmig gestalteten einheitlichen Kristall zusammenfließen. Bei solchen Zusammenballungen kommen ganz eigenartige Erscheinungen zustande, was O. Lehmann sehr anschaulich z. B. für Paraazoxybenzoesäureäthylester beschrieb. Zuzufolge der Aufnahme kleiner Kristalle in größere sehen die Gebilde dieser Substanz aus wie gedrechselte Säulchen, wie Puppen, Kegel und dergleichen. Wo eine Kristallspitze in der Flüssigkeit an ein Luftbläschen stößt, verbreitert sie sich unter fußartiger teilweiser Umschließung des Gaskügelchens. Mehrere solche benachbarte protuberanzenartige Kristalle können unter kugelschaliger gegenseitiger Verbindung verfließen. Es ist dieses oben mehr säulige, unten mehr kugelschalige Aussehen desselben Körpers wohl der anschaulichste Beweis dafür, daß es sich in der Tat um flüssige Kristalle handelt. Ganz ohne ebene Formen, aber nach der optischen Untersuchung dennoch kristallin ist z. B. das Paraazoxyanisole, das unter dem Einfluß der Oberflächenspannung stets Kugelform annimmt, wie es Flüssigkeiten zukommt. Es handelt sich dabei nicht um einen gleichmäßigen Kristall, sondern um einen kristallinen Stoff, der anscheinend zu Kreisschildern verbogen oder sonst regelmäßig gruppiert, die Kugeln aufbaut. Die Teilchen liegen in ihm gesetzmäßig, aber nicht parallel.

Von großem Interesse ist der von D. Vorländer näher untersuchte Umstand, daß manche zu kristalliner Flüssigkeit vereinigte Teilchen, z. B. Anisole-amidoazotoluol, sich auf gläserner Unterlage mit einer bestimmten Richtung und zwar senkrecht zum Glase stellen.

Im Überblick über diese mannigfachen Verhältnisse der einschlägigen weichen, quellbaren und flüssigen Substanzen kann man O. Lehmann, R. Schenck, D. Vorländer und manchen anderen Forschern, die sich in experimentellen Spezialstudien den in Rede stehenden Gebieten gewidmet haben, in der Schlußfolgerung beipflichten, daß der kristalline Zustand nicht auf die „feste“ Materie beschränkt ist. Es gibt alle Übergänge zwischen den Extremen, zwischen harten Kristallen und sehr beweglichen in sich gesetzmäßig orientierten Flüssigkeiten.

VI. Das Kristallisieren. Kristalle bilden sich aus gasförmigen, aus flüssigen und aus festen amorphen Medien und weiterhin durch molekulare Umordnung bereits kristalliner Stoffe. Dabei handelt es sich wohl kaum je um eine momentane Wandlung des ganzen Materials, sondern um zunächst zarte, kleine Anfänge, Keime, die hier und dort mehr und mehr in dem Material entstehen und wachsen. An allen diesen Stellen wird die wirre Art der amorphen Anordnung zur regelmäßigen und zwar darf man annehmen, daß beim Entstehen der Kriställchen die ungeordnete Bewegung der Teile zufällig hier und da zwei in die kristallographisch parallele Lage zueinander brachte, in der sie nunmehr verharrten. Sie wirkten dann als Zentrum einer Kristallisation und veranlaßten andere Teilchen sich parallel zum Keime auf ihm abzusetzen. Diese Vorstellung erklärt die günstige Wirkung, die man zwecks Auslösung des Kristallisationsaktes durch Zuführung von Kristallteilchen erzielt. Etwaige Übersättigungen werden dadurch aufgehoben; oft genügen erstaunlich geringe Mengen impfender Substanz.

Das Vermögen spontaner Keimbildung wechselt recht sehr von Stoff zu Stoff. Bei Kristallisation aus dem Schmelzfluß heraus, kann man in der Hinsicht eine Probe durch schnelle Abkühlung machen. Dabei zeigen sich manche Substanzen außerordentlich kristallisationsfähig. So ist es nie gelungen, Metalle amorph erstarren zu lassen. Auch Chlornatrium hat eine sehr hohe Kristallisationsfähigkeit. Von Mineralien der Eruptivgesteine ist das gleiche z. B. der Fall bei Magnetit, Olivin, Hypersthen; bei anderen gelingt es leicht, durch Abschrecken ihrer Schmelze Kristallisation zu verhindern. Quarz und Kalifeldspat schließlich sind noch nicht aus ihrem Fluß kristallin erhalten worden. Das Kristallisationsvermögen ihrer reinen Schmelze ist äußerst gering.

Eingehende Untersuchungen über spontanes Kristallisationsvermögen und über Kristallisationsgeschwindigkeit wurden insbesondere von G. Tammann angestellt; speziell an Silikaten haben V. Schumoff und E. Dittler Studien in der Hinsicht gemacht. Man erkannte, daß das Kristallisationsvermögen mit der Entfernung der herrschenden Temperatur vom Schmelzpunkte zunächst zunimmt, von einem für jeden Stoff charakteristischen Wärmegrade an sich aber wieder verringert. Danach wurde es verständlich, daß ein schnelles Überschreiten des Optimum im Kristallisationsvermögen zum Amorphen führt.

Die lineare Kristallisationsgeschwindigkeit sinkt allmählich mit der Unterkühlung.

Keime.

Kristallisationsvermögen und Kristallisationsgeschwindigkeit.

Kristallisationshöfe.

VII. Sammelkristallisation in flüssigen Medien. Die Vorstellung, welche soeben über die Kristallisationskeime gewonnen wurde, schiebt ihnen gewissermaßen eine Interessensphäre zu, aus der das Material zum weiteren Wachstum des Kristalls genommen wird. Deutliche Anzeichen dafür fand man in den sogenannten Kristallisationshöfen vor, die z. B. in gefärbten, amorph erstarrten Schmelzen als nach außen abklingende lichte Zonen um eisenreiche Kristalle herum beobachtet werden. Der Hof ist durch Diffusion der eisenhaltigen Verbindung zum Kristall und den Niederschlag auf diesen heller gefärbt als die weitere Umgebung. H. A. Miers studierte eingehend entsprechende Erscheinungen an in wäßriger Lösung wachsenden Kristallen.

Kristallisationsentmischung von Lösungen.

Es handelt sich bei solchen Kristallisationen zunächst um eine stoffliche Differenzierung in der Flüssigkeit. Der Festwerdung eines jeden Kristalls geht, wie F. Loewinson-Lessing betonte, eine Wanderung der kleinsten Teilchen im flüssigen Zustande voraus, die beim Weiterwachsen des Kristalls fort dauert. Die Stoffe begeben sich nach dem Punkte, an welchem die Übersättigung durch Kristallbildung aufgehoben wird. Dabei bilden sich je nachdem sehr viele Mittelpunkte der Kristallisation mit kleinen Höfen oder wenige mit weiteren Rekrutierungsbezirken. Im ersteren Falle ergeben sich Scharen winziger Kristalle, im letzteren weniger zahlreiche und dafür größere Individuen. Abgesehen vom Kristallisationsvermögen der Substanz, wird das von den Verhältnissen abhängen, welche die Diffusion beeinträchtigen oder fördern. Leichte innere Beweglichkeit einer Schmelze wird für die Entstehung großer Kristalle nützlich sein; doch ist bei den Kristallisationen in der Natur, insbesondere bei den Magmen, offenbar auch die Zeit ein gewaltiger Faktor gewesen. Gerade Gesteine wie Granit, Syenit, Diorit, Gabbro, bei denen man voraussetzen kann, daß sie als „Plutonite“ in der Tiefe der Erdkruste sehr langsam erkalteten, sind grobkristallin gebaut, im Gegensatz zu den als Schmelzfluß an der Erdoberfläche ergossenen Gesteinen, den „Vulkaniten“, z. B. dem Quarzporphyr und Basalt. Bei ersteren konnte sich eine Sammelkristallisation geltend machen, bei letzteren nicht oder nur in den ersten Stadien der Verfestigung. Dafür spricht der Gegensatz zwischen großen Kristallen (Einsprenglingen) und einer dichten Grundmasse. Offenbar waren die Verhältnisse der Erkaltung des Schmelzflusses anfangs der Bildung großer Individuen günstiger als später. Beim Granit oder Gabbro lag die Möglichkeit der Sammelkristallisation bis zum Schlusse der Verfestigung vor; wenn auch die Temperatur sank und den Schmelzfluß zäher machte, so geschah es doch so langsam, daß die Teilchen aus großen Rekrutierungshöfen sich versammeln und anderen älteren Ausscheidungen sich anschließen konnten. Eine Grundmasse entwickelte sich nicht.

Die Sammelkristallisation begünstigende Umstände.

Unter der Gunst der Umstände entstanden gelegentlich förmliche Riesenkongesteine, so die Pegmatite der Granite mit oft fußgroßen Quarzen, Feldspaten und Glimmern. Möglicherweise hat bei ihnen die große Beweglichkeit einer wasserhaltigen Schmelze die Diffusion der Stoffe in der heißen Lösung wesentlich unterstützt.

Schließlich kann man sich vorstellen, daß eine solche Sammelkristallisation in geradezu geologische Dimensionen übergeht und zur Anhäufung von Scharen bestimmter Gemengteile an besonderen Stellen des erstarrenden Schmelzflusses führt, derart, daß sich im Eruptivgesteinsvorkommen z. B. eine aus kieselsäurearmen Mineralien bestehende randliche Zone und ein kieselsäurereiches Innere entwickelt. Für eine solche „Randfacies“ wäre der plausible Grund anzunehmen, daß an den Grenzen zum Nebengesteine das Magma sich zuerst auf die zur Kristallausscheidung nötige Temperatur abkühlte, oder auch, daß hier durch reichliche Entgasung der Anstoß zur Kristallisation bereits gegeben war, als im Kern des Vorkommens noch keine Verfestigung stattfand.

Ein Analogon solcher Kristallisationsentmischung oder, wie A. Becker den Vorgang nannte, „fraktionierten Kristallisation“ hat man nach dem Verfasser in der Bildung einer Eisdecke auf der Oberfläche des Meeres. Hier an der kühlfsten Stelle findet die erste Verfestigung statt und zwar der in der Lösung im großen Überschuß befindlichen Komponente  $H_2O$  als Eis. Fortgesetzt gelangen immer neue  $H_2O$ -Teile der  $H_2O$ -NaCl-usw.-Lösung an den älteren Kristallisationen zum Absatz, so daß sich eine gelegentlich wohl mehrere Meter dicke reine Eiskruste auf dem Meerwasser entwickelt.

VIII. Sammelkristallisation fester Stoffe. Geeignet, die Vorstellung vom allgemeinen Wesen des Kristallisationsvorganges zu vertiefen, ist weiterhin eine von F. Rinne mit dem Namen Sammelkristallisation fester Stoffe belegte Erscheinung: unter bestimmten Umständen vereinigen sich viele kleine, zusammenliegende Kristalle, ohne sich zu verflüssigen, also in festem Zustande, zu größeren Einheiten; eine höchst merkwürdige Tatsache, daß trotz der Starrheit der Kristallformen für sie doch die Möglichkeit besteht zusammenzufließen, wie es sonst wohl Flüssigkeiten tun, sich parallel zu reihen und wenige große Kristalle aus vielen kleinen zu bilden. Bei Metallen ist die Erscheinung sehr leicht zu bekunden. Hält man z. B. ausgewalztes Blei, Zink oder Cadmium einige Stunden oder besser Tage bei erhöhter Temperatur (aber unter dem Schmelzpunkt), so kann man eine außerordentliche Vergrößerung des Kornes beobachten. Feinst gebauter Stahl, Gold und Kupfer zeigen die nämliche Erscheinung nach nur einige Minuten dauerndem, sehr kräftigen Glühen. Ebenso wandelt sich dichter Kalkstein, der aus unzähligen kleinen Calcitkriställchen besteht, bei Gelbglut in einer Bombe nach F. Rinne und H. E. Boeke in ganz kurzer Zeit alsbald in gröber gebautes Material um, ein Vorgang, der gewiß auch bei der Marmorisierung von Kalkstein im Kontakthof (d. h. in der Nachbarschaft der natürlichen Schmelzflüsse) eine Rolle spielt.

Der die Sammelkristallisation begünstigende Umstand liegt offenbar in der gegenüber den Verhältnissen bei niederen Temperaturen weit größeren Beweglichkeit der erhitzten kleinsten Teile; ihre Einflußsphäre erstreckt sich über die Individuumgrenze hinaus, und im Sinne J. Beckenkamps könnte man denken, daß die von bevorzugten Partikeln ausgehenden Kräfte andere nunmehr leicht bewegliche Teilchen in die Parallelstellung drängen, also deren Raumgitter umordnen.

Sammelkristallisation als Ursache der Faciesbildung von Eruptivgesteinen.

Meeres als Facies zufolge Sammelkristallisation.

Vereinigung kleiner Kristalle zu großen im festen Zustande der Materie.

Egalisierungs-  
kristallisation.

Im anderen Falle fand man übrigens, daß die erhöhte Beweglichkeit kleiner Teilchen ihren vorhandenen Parallelismus gefährdet. Größere Calcitbruchstücke mit kleineren gemengt zerfallen in der Glühhitze, die kleinen hingegen wachsen zusammen, und so gibt es denn ein mittelkörniges Aggregat (Egalisierungskristallisation).

Neubildungen in  
fester Materie.

IX. Das „Umstehen“. Während bei den soeben geschilderten Vorgängen der Sammelkristallisation lediglich eine Vergrößerung oder Anhäufung von Kristallen statt hat, ist für einen anderen hier zu besprechenden bedeutsamen Kristallisationsvorgang in festen Stoffen, beim „Umstehen“, kennzeichnend, daß sich ganz neue Körper herausbilden. Dahin gehört das Kristallinwerden des Glases beim langen Lagern, ein Vorgang von großem Interesse für den Mineralogen und Petrographen, die nach solcher Erfahrung mit dem Umstehen auch natürlicher Gläser im Gange der geologischen Zeitläufe rechnen dürfen.

Begünstigt wird diese regelmäßige Aggregation der vorher wirr gelagerten Teilchen amorpher Stoffe durch erhöhte Temperatur. War beim Erstarren von Schmelzflüssen die Kristallisationsentmischung zufolge schnellen Wärmeverlustes von der Verfestigung überholt, so wird durch nachherige langdauernde, wenn auch vielleicht nicht einmal sehr hohe Erwärmung den Teilchen günstigere Gelegenheit zur parallelen Gruppierung gegeben. In der Natur mag das Versinken von glasigem Gestein in wärmere Erdkrustenteile ein Kristallisationsumstehen veranlassen. Es ist ganz charakteristisch, daß man in dem metamorphosierten kristallinen Schiefer kein Glas findet.

Ein Umstehen amorpher Teile in kristalline im großen Maßstabe hat sich in der Natur anscheinend auch an vielen kolloidalen Verwitterungserzeugnissen vollzogen, ähnlich den Vorgängen bei manchen Niederschlägen des Chemikers, die sich erst amorph ausscheiden und dann kristallin werden.

Der umgekehrte Fall des Umstehens von Kristallisiertem in Amorphes wird von seltenen Mineralien, wie Gadolinit, berichtet, doch ist es noch zu erweisen, ob wirklich amorphe und nicht etwa kristallin-isotrope Materie im Umwandlungsprodukt vorliegt.

Eine andere in der Natur und bei Kunstprodukten sehr verbreitete Erscheinung des Umstehens ist die der Änderung einer Modifikation eines kristallinen Stoffes in eine andere zufolge Temperaturwechsels. Eine große Zahl von Stoffen ist polymorph, d. h. verschiedener Kristallstruktur fähig. Es wird darüber weiter unten näher verhandelt werden. Hier sei darauf verwiesen, daß im allgemeinen ein bestimmtes Temperaturintervall Bedingung für die Existenz einer jeden Modifikation ist. Ändert sich der Wärmegrad von einem ins andere Gebiet, so gruppieren sich die Teilchen ohne stoffliche Veränderung um. Das haben z. B. alle die milliarden Leucite des Vesuv getan, die in den Lavamassen bei Temperaturen über  $700^{\circ}$  entstanden und dabei isometrisch kristallisierten, nun aber abgekühlt und umgestanden als orthotrimetrische Substanz vorliegen. Erhitzung über die Modifikationsgrenztemperatur von etwa  $700^{\circ}$  hinaus bringt den Leucit wieder in die alte Art zurück, in der er so lange verbleibt, als der Wärmegrad  $700^{\circ}$  übersteigt.

Manche andere kristallographisch wichtige Umstehungsvorgänge beruhen auf einer Änderung der Löslichkeit fester Stoffe ineinander. Ist die Aufnahmefähigkeit einer Substanz für eine zweite bei hohen Wärmegraden bedeutender als bei niedrigen, so scheidet sich diese beim Erkalten entsprechend der gesunkenen Löslichkeit zum Teil aus. Als ein höchst interessantes und praktisch bedeutsames Beispiel dafür erwies sich das Eisen, das bei hohen Temperaturen bekanntermaßen sehr beträchtliche Mengen von Eisencarbid in fester Lösung zu halten vermag. Beim Erkalten verringert sich diese Fähigkeit, schließlich erlischt sie ganz und die feste Lösung gliedert sich in Kristalle aus reinem Eisen und solche aus Eisencarbid (Cementit). Mit Sicherheit läßt sich eine Differenzierung in festem Zustande auch beim Meteoreisen annehmen; es lag in ihm ursprünglich eine gleichmäßig feste kristallisierte Lösung von Eisen und Nickel vor. Beim Abkühlen teilte sie sich in nickelarmes Eisen, den Kamacit, und nickelreiches Eisen, den Taenit, auseinander; sie gruppierten sich in zierlicher Durchdringung gesetzmäßig miteinander und liefern beim Anätzen polierter Meteoreisenplatten die sogenannten Widmannstätten'schen Figuren. C. Benedicks gelang es, diesen interessanten Entmischungsvorgang künstlich auszuführen, indem er eine den Meteoreisen ähnlich zusammengesetzte künstliche Eisen-Nickel-Legierung einige Tage bei erhöhter Temperatur hielt.

X. Ab- und Umbau von Kristallen. Denkt man sich den Bau der Kristalle als eine Architektur aus regelmäßigen Systemen, so liegt der Versuch nahe, ab- und umzubauen, d. h. mehr und mehr an Gebäudeteilen herauszunehmen, ev. bis zur letzten Möglichkeit des Zusammenhaltens, und ferner auch, entfernte Bauelemente durch andere zu ersetzen.

Im allgemeinen gelingt der Versuch nicht. Beim chemischen Angriff stürzt das kristallographische System zu einem wirren Trümmerhaufen in sich zusammen; es weist keine architektonischen Beziehungen zum Ausgangsmaterial mehr auf. Gelegentlich aber ist es möglich, gewisse Bauelemente zu entfernen, ohne das übrige zu gefährden. Ein Rest bleibt stehen und zeigt kristallographisches Gefüge, wengleich in gelockerter, gewissermaßen in luftiger Art. Zuweilen auch ließen sich neue, sogar ganz fremdartige Bausteine einsetzen. In der Weise wird man von E. Mallard, G. Friedel, F. Grandjean, F. Rinne u. a. untersuchte chemische Reaktionen an Mineralien wie Brucit, Koenenit, an Zeolithen und Biotit deuten können.

Ein sehr einfaches Beispiel ist der Brucit, ein in schönen weißen Tafeln kristallisierendes Mineral mit ausgezeichneter Spaltbarkeit nach der Blättchenebene. Seine Zusammensetzung ist  $\text{Mg}(\text{OH})_2 = \text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Man könnte sich vorstellen, daß in ihm ein regelmäßiges Punktsystem von Rhomboederform vorliegt. Das unversehrte Mineral kennzeichnet sich optisch durch Wirtelbau nach Art eines Rotationsellipsoides, dessen Drehachse mit der Senkrechten auf der Spaltfläche zusammenfällt. Durch Erhitzen läßt sich das Wasser des Brucits vollständig entfernen. Dabei werden die vorher klaren Kristalle zwar zufolge von kleinen Rissen mehr oder minder trübe, indes hellt Öl sie leicht auf. F. Rinne erkannte bei der optischen Untersuchung, daß nicht

Herausnahme  
und ev. Ersatz  
von Teilen der  
Kristallgebäude.

Beispiele für kristallographisch-  
chemischen  
Abbau.

Abbau von  
Brucit.

etwa ein wirres Haufwerk der einzelnen Partikel vorliegt, vielmehr ein in seinen Teilen noch wohlgeordnetes Kristallgefüge besteht. Wie beim Ausgangsmaterial sind die optischen Verhältnisse durch ein Rotationsellipsoid mit Drehachse senkrecht zur Spaltfläche gekennzeichnet. Es ist also das Kristallgebäude durch Herausziehen der Wasserteilchen gelockert, aber nicht zertrümmert, vielmehr in seiner optischen Symmetrie erhalten geblieben, ähnlich wie man aus einem von reichlichen Säulen getragenen Bauwerk wohl eine Anzahl Stützen entfernen kann, ohne daß Zusammensturz eintritt. Daß eine regelmäßige Veränderung sich vollzogen hat, kann man beim entwässerten Brucit (Metabrucit) am Umschlag und an der Schwächung der Doppelbrechung erkennen.

Abbau von  
Koenenit.

In noch weitgehendem Maße läßt sich Entsprechendes beim gleichfalls vom Verfasser studierten Koenenit vornehmen. Es ist ein nach demselben geometrischen Typus wie Brucit gebautes Mineral, aber von weit verwickelterer chemischer Art; seine Zusammensetzung wird durch die Formel  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{MgO} \cdot 2 \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  wiedergegeben. Das physikalisch-kristallographische Gebäude des Koenenits läßt sich Gruppe für Gruppe durch Kochen mit Wasser und dann mit Salmiaklösung, sowie weiter durch Glühen abbauen. Zunächst wird das Magnesiumchlorid, dann auch eine zweite Baugruppe, das Magnesiumoxyd, schließlich aus der schon stark reduzierten Architektur der Wasserrest herausgenommen, so daß vom ganzen komplizierten Bau nur noch das Tonerdesystem verbleibt. End- und Anfangszustand, sowie die Zwischenstufen gehören demselben kristallographischen Bautypus an, unterscheiden sich also optisch nur quantitativ, nicht qualitativ. Die Doppelbrechung ist geschwächt und umgeschlagen.

Abbau von  
Biotit (Baueritisierung).

Von den Silikaten sei zunächst im Biotit ein Beispiel für kristallographisch-chemischen Abbau erwähnt. Es handelt sich bei diesem ungemein verbreiteten Mineral um ein verwickeltes Orthosilikat, dem man die Formel  $(\text{K}_2, \text{H})_3 (\text{Al}, \text{Fe})_3 (\text{SiO}_4)_3$  verbunden mit wechselnden Mengen von  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{SiO}_4$  geben kann. Auch bei ihm besteht die Möglichkeit, ohne Einsturz abzubauen und zwar bis zum  $\text{SiO}_2$ -System, das eine silberweiße Pseudomorphose nach dem schwarzen Biotit bildet. Das Endprodukt des Auslaugens mit Schwefelsäure oder Salzsäure und des Glühens, letzteres zum Verjagen des Wassers aus dem  $\text{SiO}_2$ -Gebäude, hat durchaus kristallgerechte Art und entspricht unter Abschwächung der Doppelbrechung noch dem Biotit.

Hat man bei diesen Versuchen den basischen Bestandteilen des Biotits gewissermaßen freie Bahn gegeben, aus dem Verbands fester Teile des Kristalls in Lösung zu wandern, während der Kieselsäurerest als unlösliches Gerüst des Gebäudes zurückbleibt, so kann man vermuten, daß es möglich sei, auch noch den einen oder anderen Bestandteil am Abmarsch zu hindern, falls beim Abbau eine Lösung wirkt, die an ihm selbst gesättigt ist.

In der Natur wird der dunkle Glimmer gleichfalls in mehr oder minder weitgehendem Maße abgebaut vorgefunden. Es äußert sich das, wie besonders von E. Zschimmer und K. D. Glinka näher untersucht wurde, in dem Wechsel der Farbe, die aus Schwarz ins Bräunlich-Metallische und Silbergraue im reflek-



tierten Lichte übergeht, ein Zeichen der Eisenentföhrung, in der Verringerung des spezifischen Gewichtes und in Änderung der Brechung. Zschimmer konnte die chemische Änderung des Biotits bis fast zur Herausbildung von Aluminiumhydroorthosilikat noch verbunden mit Magnesiumorthosilikat verfolgen. Es ist anzunehmen, daß der interessante Vorgang, der von F. Rinne zu Ehren von Prof. M. Bauer Baueritisierung genannt wurde (die in Wandlung begriffenen Glimmer sowie schließlich das Endprodukt heißen Bauerit), auch in der Natur seine Tendenz zur Bildung von Kieselhydrat gelegentlich noch weiter verfolgt hat. Natürlich aber wird der Vorgang je nach der Zusammensetzung der abbauenden Lösungen und ihrer Temperatur ein wechselvolles Bild darbieten, wie sich ja schon aus dem offenbar verwandten Prozesse der Chloritisierung ergibt, einem Verwitterungsvorgang, der beim dunklen Glimmer gleichfalls einen kristallographischen Abbau vorstellt.

Ähnlich wie beim Biotit kann man das Kristallgebäude von Zeolithen Abbau von Zeolithen. lockern und bis auf einen Rest einreißen, der in seinem optischen Wesen an das Ausgangsmaterial anklingt. So erhält man, wie F. Rinne zeigte, sowohl aus Heulandit als auch aus Brewsterit sowie aus Desmin chemisch dasselbe Produkt: Siliciumdioxid; in seinem Aufbau, wie er sich durch die optischen Verhältnisse offenbart, erinnert es aber das eine Mal an den Heulandit, das andere Mal an Brewsterit, beim Verwenden von Desmin an diesen. Es sind wohl parallel stehengebliebene  $\text{SiO}_2$ -Reste dieser verschieden gebauten Mineralien.

In gewisser Hinsicht noch eigenartiger erscheinen die Verhältnisse bei der Entwässerung der Zeolithe durch Erwärmen. Man hat Grund zur Annahme, daß in diesen Mineralien feste Lösungen von Silikat und Wasser vorliegen. Demgemäß verdunstet letzteres beim Erhitzen nicht molekölweise mit sprungweise wechselnder Tension, sondern unter Herstellung von Gleichgewichten mit beliebigen Molekölverhältnissen von Silikat zu Wasser, die von der Temperatur und dem Wassergehalt der Luft abhängen. Auch hier wird man sich mit dem Verfasser und A. Johnsen die Vorstellung von regelmäßigen Punktsystemen machen können, aus denen die Wasserteilchen allgemach herausgenommen werden. Ein Zerfall des Kristallgebäudes tritt nicht ein, wie an den optischen Verhältnissen zu erkennen ist; in interessantem regelmäßigen Wechsel stellen letztere charakteristische, ungemein lebhaft verlaufende physikalische Parallelerscheinungen der Wasserentziehung dar. Was nun aber überraschen muß, ist die von G. Friedel bewiesene Möglichkeit, nicht nur ausgetriebenes Wasser in bestimmten Fällen wiedereinföhren, sondern auch durch ganz andere Stoffe wie Alkohol, Kohlensäure, trockne Luft, Schwefelkohlenstoff, Jod, Quecksilber u. a. m. ersetzen zu können, also im Kristallgebäude gewissermaßen die durch Herausnahme der Wasserbausteine entstandenen Lücken durch sehr abweichendes Material wieder ausfüllen zu können. So läßt es sich z. B. nach F. Rinne beim Chabasit-Zeolith vorföhren, der nach bestimmter Entwässerung Schwefelkohlenstoff, in den man ihn legt, in sich hineinbaut und in regelmäßiger Art hierbei seine optischen Verhältnisse ändert zum Zeichen, daß es sich nicht um mechanisches Aufsaugen, sondern um eine

Stoffaufnahme in das feinere Gefüge handelt. Ebenso erstaunlich ist es zu beobachten, was J. Grandjean nachwies, daß bei 500° entwässerter Chabasit 37% Quecksilber und dazu noch 26% Wasser in seinen Bau in regelmäßiger Gruppierung zum übrigen eintreten läßt.

So kommt man denn zur Meinung, daß in das Kristallgebäude des Zeolithsilikates recht verschiedene Bewohner einziehen können; sie sind also wahrscheinlich nicht die Stoffe, welche die Kristallstruktur der in Rede stehenden Mineralien bedingen. Diese Bedeutung wird man dem Silikatrest zuschreiben müssen, und in der Hinsicht ist es daher von nicht geringem Interesse zu sehen, daß in der Tat die gewässerten Substanzen von Zeolithen geometrische Züge entsprechender anhydrischer Silikate tragen. Das trifft z. B. zu beim Desmin, Phillipsit und Harmotom, die alle ein Feldspatsilikat bergen und ganz unverkennbar in Flächenvereinigung und Zwillingsbildung auch in gewissen Winkeln den Feldspaten nahe stehen, gleichwie es die verwandten Zeolithe Heulandit und Epistilbit tun. Das nämliche Verhältnis zueinander zeigen der gewässerte Analcim und der wasserfreie Leucit.

#### Geometrische Kristallographie.

Methoden der  
Goniometrie.

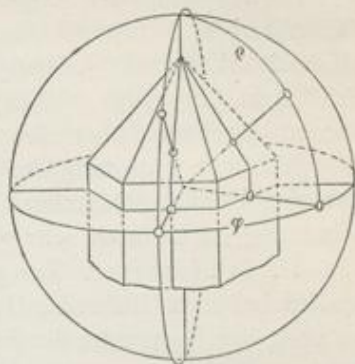
I. Goniometrische Kennzeichnung der Flächenanlage und das Gesetz von der Konstanz der Neigungswinkel. Die Mannigfaltigkeit in der Anlage der einen Kristall, z. B. einen Quarz (Fig. 1, S. 533) umgrenzenden Ebenen läßt sich in der Art ordnen, daß man die Winkel in den Kristallflächen mißt und die Neigungen dieser zueinander berechnet. In der Form wurde die erste Messung an einem Kristall ausgeführt und zwar durch Erasmus Bartholin (1670) am Kalkspat, dessen Winkel der Rhomboederflächen mit einander er zu  $103\frac{1}{2}^\circ$  bestimmte. Weit einfacher aber ist es, die Neigungswinkel einer Fläche zu benachbarten direkt zu messen, von diesen zu anderen goniometrisch fortzuschreiten, und schließlich auch die Winkel zwischen nicht in Kanten zusammenstoßenden Flächen zu erkunden. In der Weise hat man seit Beginn der geometrischen Kristallographie bis heute die Flächen der Kristalle festgelegt, beiläufig gesagt, in neuerer Zeit mehr und mehr unter Verwendung der „Normalenwinkel“ der Flächen zueinander, d. h. der Neigung der Flächenlote an Stelle der „inneren Winkel“. Es wird dadurch der Richtungssinn der Kristallflächen anschaulich gekennzeichnet. Natürlich ergänzen die Normalenwinkel die inneren Winkel zu  $180^\circ$ .

In den letzten Jahren macht sich aber eine andere Methode, die Lage der Flächen an einem Kristall zu charakterisieren geltend, insbesondere zufolge zahlreicher Arbeiten V. Goldschmidts und seiner Schüler. Sie schließt an den Gedanken an, daß die Richtung des Flächenlotes die Lage der Fläche bestimmt und jenes wiederum in einfachster Weise in dem Punkte gekennzeichnet wird, in welchem es eine den Kristall konzentrisch umgebende Kugel durchsticht.

Wie man die Lage von Sternen am Himmelsgewölbe durch Azimut und Höhe (bzw. Polardistanz) oder Orte auf der Erdkugel durch Länge und Breite vermerkt, so kann es mit den erwähnten Kugelpunkten geschehen. Zwei Winkel, Länge  $\varphi$  und Polardistanz  $\rho$ , werden als Lagenelemente der Kristallflächen aufgestellt, nachdem Äquator und erster Meridian durch eine horizontale Ebene senkrecht zu einer vertikalen Kristallfläche und eine zweite senkrechte Ebene normal zur Ausgangsfläche festgelegt sind.

Wie all dieses in einfacher Weise geschieht, sei später geschildert. Hier wird das erste allgemeine Ergebnis kristallographischer Winkelmessung interessieren, das man im Gesetz von der Konstanz der Neigungswinkel vor sich hat. Es besagt, daß jeder Kristallart ganz bestimmte, an sämtlichen Individuen gleiche Neigungen der sich entsprechenden Flächen zukommen. Alle Bergkristalle besitzen Normalenwinkel von  $60^\circ$  zwischen den Flächen  $\rho$ , solche von  $38^\circ 13'$  zwischen  $\rho$  und  $\tau$ , und von  $46^\circ 16'$  zwischen  $\tau$  und  $\tau$  der Fig. 1, S. 533; stets beträgt der bei Zimmertemperatur gemessene Wert des Rhomboederwinkels am Kalkspat  $74^\circ 55'$ , und entsprechend liegt es bei den anderen kristallisierten Stoffen.

Es ist eigenartig, daß dies die Kristallwelt wohl am auffallendsten beherrschende Gesetz der Konstanz der Neigungswinkel erst sehr spät erkannt ist. Unter den Griechen und Römern, das Mittelalter hindurch hat kein Betrachter des „Kristalls“ seine Regelmäßigkeit herausgefunden. Noch in C. Gessners (1516—1565) Werke *De rerum fossilium, lapidum et gemmarum figuris* wird ausdrücklich betont, „ein Kristall“ (also Quarz) „ist von dem anderen durch seine Winkel unterschieden“, und Cäsalpinus (1519—1603) hielt es für ein Vorrecht des Organischen, „bestimmte Gestalten zu erzeugen“. Erst der Arzt und Bischof Niclas Steno (1638—87), ein Forscher der mit E. Bartholin und Chr. Huygens, wie A. Schrauf mit Recht vermerkt, in naturwissenschaftlicher Erkenntnis seiner Zeit um mehr als ein Jahrhundert voran- eilte, hob die gesetzmäßige Grundlage der Formenwelt der Kristalle unter Hinweis auf Quarz, Eisenglanz und Pyrit hervor, die Tatsache nämlich, daß die Zahl und Länge ihrer Seiten sich mannigfach ändere „non mutatis angulis“. Beim Kalkspat stellte er die innere Neigung der Rhomboederflächen als ständige Winkelgröße von  $105^\circ$  fest, beiläufig bemerkt, ein sehr gutes, von der Wirklichkeit nur um  $5'$  abweichendes Messungsergebnis. Schließlich wies J. B. Romé de l'Isle (1772) nach, daß die Regelmäßigkeit der Winkelverhältnisse für die Kristalle allgemeine Gültigkeit hat. Er schrieb: „mais, au milieu des variations sans nombre . . . il est une chose qui ne varie point, et qui reste constamment la même dans chaque espèce; c'est l'angle



Erstes kristallographisches Grundgesetz.

Fig. 6. Kennzeichnung der Lage von Kristallflächen durch Länge  $\varphi$  und Polardistanz  $\rho$ .

d'incidence ou l'inclinaison respective des faces entre elles". Im Lichte dieser Erkenntnis verloren die kristallisierten Gebilde den Charakter des willkürlich Gestalteten, den man ihnen früher zuschrieb, ihre Form wurde zur charakteristischen Physiognomie.

Die Konstanz der Neigungswinkel ist natürlich ein ungemein praktisches Hilfsmittel zur Unterscheidung kristallisierter Stoffe. An den Winkeln des Minerals erkannte R. J. Haüy vor den Chemikern, daß der „spanische Chrysolith“ kein Chrysolith (Olivin), sondern Apatit ist, daß Beryll und Smaragd zusammengehören, aber nicht Hyacinth und Mejonit.

Jetzt hat man dank der Meßfreudigkeit vieler Kristallographen Kenntniss von den Winkelverhältnissen Tausender von kristallisierten Stoffen; ihre Bestimmung ist dadurch sehr wesentlich erleichtert.

Apparate der  
Kristallwinkel-  
messung. An-  
legegoniometer.

II. Goniometer. Zur genauen Festlegung der Flächenneigungen an Kristallen hat man frühzeitig Goniometer konstruiert. Die älteren Mineralogen, so auch der Begründer der Kristallographie, René Just Haüy, bedienten sich des von Carangeau, dem Mechaniker Romé de l'Isles, erdachten Anlegegoniometers. In günstigen Fällen erhält man mit ihm auf  $1/2^\circ$  genaue Werte. Es besteht aus einem getheilten Halbkreis, dessen Durchmesser ein fester Winkelschenkel bildet, und einem beweglichen Arm. Die beiden Flächen, deren Neigungswinkel man sucht, werden mit dem festen und dem beweglichen Schenkel in glatte Berührung gebracht. Die Stellung des letzteren am Kreise gibt den gesuchten Wert an.

Reflexions-  
goniometer.

Weit genauer, in geeignetsten Fällen nur auf einige Sekunden fehlerhaft, läßt sich mit Reflexionsgoniometern arbeiten. Ihr Kennzeichen ist, daß aus einem Signalrohr, dem Kollimator, ein paralleles Lichtbündel strömt, um von der Kristallfläche in ein Beobachtungsfernrohr reflektiert zu werden. Als Signal hat sich insbesondere der M. Webskysche sich nach oben und unten symmetrisch verbreiternde Spalt bewährt; sein Reflexbild wird mit Hilfe eines Okulars mit Fadenkreuz scharf eingestellt. Dreht man den Kristall, bis die zweite Fläche das Licht genau so zurückwirft wie vorher die erste, so gibt die Messung dieser Bewegung die Ergänzung des inneren Winkels der Flächen zu  $180^\circ$ , also den Winkel der Lote auf ihnen, an.

F. Wollaston benutzte Goniometer mit vertikalem, J. Babinet die jetzt üblichen mit horizontalem Kreis. Eine wesentliche Verbesserung der nötigen Zentrierung und der Justierung, d. h. des Senkrechtstellens der Kristallkante zwischen den beiden zu messenden Flächen zum Teilkreis, erzielte R. Fuess durch eine aus zwei planen und zwei gekrümmten Schlitten bestehende Vorrichtung, die durch je zwei Bewegungen senkrecht zueinander gestattet, die Flächen schnell in die zur Messung nötige Lage am Goniometer zu bringen.

Manche Kristallographen bedienen sich mit Vorteil zweikreisiger Goniometer, wie sie insbesondere von V. Goldschmidt vorgeschlagen wurden. Sie lassen in einfacher Weise Azimut und Polardistanz ermitteln. Man liest an zwei Teilungen ab, von denen eine die Winkel in der Äquatorebene, geographisch gedacht also die Länge, und die andere die Breite bzw. die Polardistanz

als deren Ergänzung zu  $90^\circ$ , angibt, wenn die zu messende Fläche eines Kristalls das Signal des Kollimators in das Betrachtungsfernrohr wirft. Eine schickliche Kristallebene dient als Ausgangslage. Im übrigen wird ersichtlich jede Fläche für sich gekennzeichnet, so daß die Genauigkeit der Messung nur von ihrer Ausbildung, nicht von der Güte der Nachbarfläche abhängt. Auch braucht der Kristall nur einmal am Goniometer befestigt zu werden, nicht wie sonst so oft als Flächenserien mit parallelen Kombinationskanten an ihm sind.

III. Achsen, Achsenschnitte, Indizes. Außer den Flächen sind die Kanten kristallographische Bauelemente. Man wählt geeignete von ihnen zu „Achsen“ des Kristallgebäudes, die somit ein von der Natur selbst gegebenes Koordinatensystem vorstellen, auf welches die Flächen eines Kristalls bezogen werden können.

Diese Bedeutung ausgezeichneten Kanten für die Charakterisierung kristallographischer Flächenkomplexe wurde zuerst von Chr. S. Weiß (1780—1856), dem berühmten Schüler Haüy's, ins helle Licht gestellt. Er sagt mit Recht: „axis vero linea est omnis figurae dominatrix“ und fügt hinzu: „in his lineis directiones videmus, in quibus praecipue agant vires, quae formam nasci jubeant“. Zur Erläuterung des großen Vorteils dieser Weißschen Anschauungsart bei der Deutung der Kristallornamentik sei an einem in Fig. 7 dargestellten Schema das Wesentliche abgeleitet.

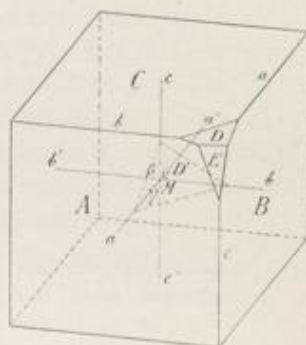


Fig. 7. Kennzeichnung der Lage von Kristallflächen durch ihre Achsenschnitte.

Wir wählen die Flächen  $A, B$  und  $C$  zu „Grundflächen“; sie geben in ihren Durchschnittslinien die drei Achsen  $a, b, c$  und durch Verlängerung dieser Linien und ihre parallele Führung ins Kristallinnere ein Achsenkreuz mit den Neigungswinkeln  $\alpha, \beta$  und  $\gamma$ . Eine vierte Kristallfläche  $D$  verlängert gedacht, möge alle drei Achsen schneiden. Ersichtlich ist ihre Lage am Achsenkreuz durch das Verhältnis der Achsenschnitte bestimmt. Es ändert sich natürlich nicht bei einer Parallelverschiebung von  $D$  etwa nach  $D'$ .

Erhebt man die vierte Fläche  $D = D'$  zum Range einer Grundform, so ergibt sie die Einheitsschnitte der Achsen und ihr Längenverhältnis  $a : b : c$ . Jede weitere Ebene, z. B. die mit  $E$  bezeichnete, kann nunmehr auf das Grundmaß durch Angabe ihrer Achsenschnitte  $ma : nb : pc$  bezogen werden.

In dieser sehr einfachen und natürlichen Art kennzeichnete Chr. S. Weiß die Lage der Kristallflächen am Achsenkreuz. Die beiden Richtungen jeder Achse lassen sich leicht durch  $a$  und  $a'$ ,  $b$  und  $b'$ ,  $c$  und  $c'$  vermerken, und wenn also am Achsenkreuz mit den Winkeln  $\alpha, \beta, \gamma$   $a : b : c$  das Urmaß des Kristallgebäudes bezeichnet, so ist unmittelbar verständlich, was z. B.  $a : nb : pc$  oder  $a' : b : c$  usw. aussagen. In der Art ist das Weißsche Symbol ( $ma : nb : pc$ ) von Kristallformen zu erklären, bei denen das mit ( ) versehene Verhältnis die Einzelfläche, das mit { } ausgezeichnete die Summe

Achsen.

Achsenschnitte.

der Flächen bedeutet, die nach Maßgabe der beim Kristall herrschenden Symmetrie zu einer Kristallgestalt gehören, etwa alle sechs Flächen eines Würfels.

Indizes.

Die sog. Indizes wurden zuerst von W. Whewell (1825) und J. G. Grassmann (1829) zur Kennzeichnung der Lage von Kristallflächen am Achsenkreuz benutzt; allgemeiner bekannt geworden sind sie durch den W. H. Millerschen

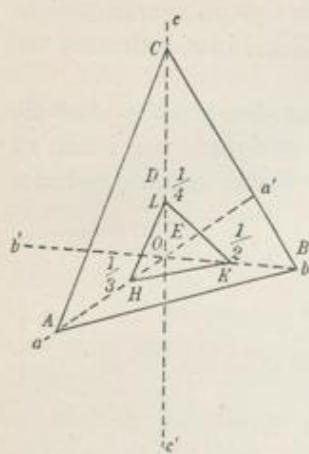


Fig. 8. Kennzeichnung der Lage von Kristallflächen durch ihre Indizes.

Treatise on crystallography (1839). Es liegt ihnen der Gedanke zugrunde, daß die Lage einer Fläche in bezug auf die einer Grundfläche  $a : b : c$  (in Fig. 8) auch durch die Angabe ausgedrückt werden kann, welchen Bruchteil des Urmaßstabes die Achsenabschnitte der zu kennzeichnenden Fläche auf den drei Achsen bilden, z. B. welchen Teil von OA in Fig. 8 der Abschnitt OH bildet und ebenso OK bezüglich OB, OL bezüglich OC. Man findet  $\frac{OA}{OH} = h$ ;  $\frac{OB}{OK} = k$ ;  $\frac{OC}{OL} = l$ . Es sind  $h k l$  z. B. 324 die Indizes der Fläche.

In neuerer Zeit wird dieser Bezeichnung der Vorzug gegeben, und es ist zu wünschen, daß sie zur alleinigen Flächenbenennung werde. Man muß bedenken, daß Äußerlichkeiten, und darum handelt es sich im wesentlichen hier doch wohl, nicht zum Ballast der Wissenschaft werden sollten, insbe-

sondere auch nicht für den Lernenden; das ist aber in der in Rede stehenden Hinsicht noch der Fall, da man außer der unmittelbar verständlichen Weißschen Bezeichnung und der Millerschen auch eine Lévy'sche, eine Naumannsche, eine Danasche und eine Goldschmidtsche benutzt.

Flächen mit gemeinsamer Richtung ihrer Durchschnittslinien.

IV. Zonen. Eine Gruppe sich in parallelen Kanten schneidender Flächen heißt man kristallographisch eine Zone. Die gemeinsame Kantenrichtung ist die Zonenachse. Sehr anschaulich zeigt sich dies sehr charakteristische Moment im Bau der Kristalle in den vertikalen Flächen des Bergkristalls der Fig. 6, S. 555. Auch aus der Abbildung wird man erkennen, daß die vom Mittelpunkte des Kristalls auf die „tautozonalen“ Flächen gefällten Lote in einer Ebene liegen; ihre Durchstichpunkte auf einer zweiten, auffangenden Ebene würden sich also auf einer Geraden befinden. Am Goniometer hebt sich eine solche Zusammengehörigkeit von Flächen zu einer Zone dadurch heraus, daß nach Einstellung der Reflexe zweier Flächen die der übrigen beim Drehen des Kristalls gleichmäßig durch das Gesichtsfeld ziehen, was zuerst A. Lévy (1822) als empfindliches Mittel zur Feststellung des Zonenverbandes heraushob.

Bereits J. Kepler (1571—1630) hatte bei seinen kristallographischen Studien die Zonen als für den Kristallbau wichtige Umstände erkannt, insbesondere aber wurden diese Verhältnisse durch den um die Entwicklung der Kristallographie hochverdienten Chr. S. Weiß gewürdigt und zuerst 1804 in einer Übersetzung der Häüyschen Mineralogie an der Hand von Beispielen

erörtert. Den Reichtum der wichtigsten Feldspatformen konnte er in wenige Zonen ordnen, die der Leser in beistehender Figur 9 leicht auffinden wird.

Wenn es schon nicht zu verkennen ist, daß der gemeinsame Zug von Kanten, gleichwie die parallel strebenden Linien eines Bauwerkes, etwa einer Säule, für den allgemeinen Eindruck eines Körpers von größter Auffälligkeit und Bedeutung sind, so erfahren diese Verhältnisse noch eine Verstärkung durch die Möglichkeit, daß eine Fläche auch in zwei oder in noch mehr Zonen liegen, mithin zwei oder mehr Zonenachsen parallel verlaufen kann. Dann ist sie, wie schon Chr. S. Weiß in einer Studie über den zonenreichen Epidot hervorhob, in ihrer Lage durch den Zonenverband bestimmt.

Man erkannte alsbald, daß sich dies unter Benutzung der Indizes in sehr einfacher Art ausdrücken läßt, zunächst insofern man die Richtung der Zonenachse, also der Durchschnittslinie zweier Flächen  $(hkl)$  und  $(h'k'l')$  im Zonen-symbol  $[uvw]$  kennzeichnet; es ist  $u = kl' - lk'$ ;  $v = lh' - hl'$ ;  $w = hk' - kh'$ . Eine Fläche  $(hkl)$ , die in einer Zone  $[uvw]$  liegt, erfüllt die Bedingung  $hu + kv + lw = 0$ . Eine Fläche, welche zwei Zonen  $uvw$  und  $u'v'w'$  angehört, hat das Symbol  $(h''k''l'')$  mit  $h'' = vw' - wv'$ ;  $k'' = wu' - uw'$ ;  $l'' = uv' - vu'$ . Durch korrespondierende Addition der Indizes zweier Flächen gewinnt man die Indizes einer die Kante zwischen ihnen abstumpfenden Ebene; sind die zwei Flächen gleichartig, z. B. die eines Würfels, so erhält man die Indizes der die Kante gerade abstumpfenden Ebene, d. h. der, welche gleiche Winkel mit den zwei Ausgangsflächen bildet. Die Subtraktion der entsprechenden Indizes gleichartiger Flächen liefert eine Ebene, welche den Winkel der Ausgangsflächen halbiert oder, was dasselbe heißt, auf der gerade abstumpfenden Fläche senkrecht steht. Alle diese erfreulich einfachen Regeln erleichtern die Kristallbetrachtung ungemein; dazu kommt der fundamental wichtige Umstand, daß die Zonenverhältnisse nichts anderes sind, als die Verkörperung eines zweiten Gesetzes, welches den Bau der Kristalle beherrscht, und von dem alsbald die Rede sein wird.

V. Zweites kristallographisches Grundgesetz. Die ersten Erfahrungen über die Ornamentik der Kristalle zeigten bereits, daß an ihrem Gebäude nicht Flächen beliebiger Lage vorkommen, sondern solche, die zueinander in bestimmter Beziehung stehen. Die Ausschmückung der Kristallwelt erwies sich also durch ein bedeutsames Gesetz eingeeengt, das auf verschiedene Art als kristallographisches Grundgesetz beschrieben wurde. Eine arithmetische Weise, das Wesen des Kristallbaues zu kennzeichnen, ist durch die Weißsche Flächenbezeichnung gegeben. Bedeuten in Fig. 7, S. 555 wiederum A, B, C drei ein Eck bildende, sonst beliebige Kristallflächen, und a, b, c die in den Durchschnittslinien von A, B, C gegebenen Kanten, also das Achsenkreuz, so gibt eine vierte Grundfläche durch ihre Achsenschnitte das Achsenverhältnis  $a : b : c$ . Es ist im vorliegenden allgemeinen Fall irrational, beim Axinit z. B.  $a : b : c = 0,4927 : 1 : 0,4511$ . Das kristallographische Grundgesetz besagt nunmehr, daß die Achsenschnitte aller übrigen Flächen des Kristalls rationale



Fig. 9. Zonen an einem Feldspatkristall.

Zonenverband und Indizes.

Zweites kristallographisches Grundgesetz.

Rationalitätsverhältnis der Weißschen Koeffizienten.

Vielfache (bzw. Brüche) des Grundmaßes darstellen. Die Koeffizienten  $m, n, p$  im Weißschen Zeichen  $ma : nb : pc$  sind also rationale und zwar meist einfache Zahlen, wie  $\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, 2, 3$  oder auch  $\infty$ .

Es möge schon hier darauf hingewiesen werden, daß dies Parametergesetz der rationalen Achsenschnitte abgeleiteter Flächen seinen einfachen Ausdruck auch in den Haüyschen Dekreszenzen und Bravais'schen Raumgittern findet. Die drei das Achsenkreuz ergebenden Grundflächen entsprechen den drei Netzebenen, die Achsen sind Netzlinien. Eine Fläche durch die dem Ausgangseck nächstliegenden drei Punkte stellt die einfachste vierte Grundfläche dar. Im allgemeinen Fall ist das Verhältnis  $a : b : c$  irrational. Eine fünfte Fläche, die sich als eine beliebige andere Netzebene darstellt, schneidet natürlich auf den drei Achsen rationale Vielfache der Achsenlängen  $a, b$  und  $c$  ab, eine Regelmäßigkeit, die eben das in Rede stehende Parametergesetz beschreibt. Daß die Kristallflächen mit dem Grundmaß gewöhnlich durch einfache Zahlen verbunden sind, entspricht dem Umstande, daß Flächen mit großer Netzdichte am Kristall am wahrscheinlichsten sind und daß solche Ebenen die einfacheren Koeffizienten der Achsenschnitte aufweisen.

Rationalität der Indizes.

Das in Rede stehende, die geometrische Erscheinung der Kristallwelt ganz allgemein kennzeichnende Grundgesetz ließ sich natürlich auch unter Benutzung der Indizes formulieren. Denn wenn die Achsenschnitte kristallographisch möglicher Flächen im Verhältnis der Rationalität stehen, so mußte das auch bezüglich der Indizes gelten, die ja nichts anderes sind als gleichfalls der Ausdruck des nämlichen Verhältnisses. Die Indizes der Kristallflächen sind rationale einfache Zahlen.

Zonengesetz.

Schließlich kann man das kristallographische Grundgesetz in Rücksicht auf die Beziehungen der Zonen erläutern, so daß es auch als Zonengesetz gekennzeichnet werden kann. Es besagt in dieser geometrischen Form, daß alle Flächen, die sich an einem Kristall aus dem Zonenverbände ergeben, mögliche Gestalten vorstellen.

Besonderheiten.

Bei allen diesen Erörterungen über den nach einfachen rationalen Indizes seiner Flächenanlage gekennzeichneten Kristallbau ist aber nicht zu vergessen, daß es sich lediglich um eine Erfahrungsregel handelt, die zudem durch die recht häufigen „Vizinalflächen“, die einfachen Flächen zwar genähert sind, aber genau genommen oft recht komplizierte Indizes aufweisen, eine bedeutende Einschränkung erfährt. Andererseits ist nicht zu verkennen, daß die Annahme der Gültigkeit des Grundgesetzes zu Folgerungen bezüglich der möglichen Symmetrieeigenschaften der Kristalle geführt hat, die von der Erfahrung durchaus bestätigt sind. So wird es in der Tat mit Recht als das Leitmotiv und Charakteristikum im Bau der Kristallpolyeder aufgefaßt.

Symmetriegesetz.

VI. Kristallographische Symmetrieelemente. Der künstlerische Eindruck, den ein Körper auf den Beschauer macht, wird nicht zum wenigsten bedingt durch die dem Gegenstande innewohnende Symmetrie, durch das am Ganzen mehr oder minder häufige Wiederkehren von Bauteilen, sei es in gleicher Art wie die Riefen einer Säule sich wiederholen oder in analoger



etwa spiegelbildlicher Ausbildung wie bei den Augen im menschlichen Gesicht. In besonders schöner Einfachheit und Strenge offenbaren sich die Symmetriegesetze in der durch ebene Flächen, gerade Kanten und durch Ecken geschmückten Kristallwelt. Wie sie in goniometrischer Hinsicht im Sinne des Stenoschen Gesetzes das Bild starrer Konstanz darbietet, so ist auch das Symmetriegesetz, das einer Kristallart innewohnt, wenigstens nach der üblichen Annahme, unveränderlich; alle ihre Individuen sind sich in der Hinsicht gleich. Schon R. J. Haüy betonte dies Gesetz der Symmetriekonstanz, indem er schrieb: „Quand une forme cristalline se modifie, la modification se répète de la même manière et produit le même effet sur toutes les parties extérieures de la forme (faces, angles ou arêtes), qui sont de même espèce et identiques entre elle au point de vue géométrique.“

Als einfaches Beispiel sei in der Hinsicht der Würfel gewählt, an dem ohne weiteres die Gleichberechtigung der sechs Flächen, acht Ecken und zwölf Kanten heraustritt. Wird seine Gestalt, sei es an Ecken oder Kanten, durch Nebenformen ornamentiert, so geschieht es normalerweise dieser Symmetrie entsprechend. Eine Fläche, welche eine Ecke gleichmäßig fortnimmt, hat sieben andere von entsprechender Lage zur Folge: die einfache Form des Würfels wandelt sich in die der Kombination Würfel und Oktaeder. Die gerade Abstumpfung einer Kante läßt in Verfolg der Symmetrieforderung die Vereinigung von Würfel und Rhombendodekaeder entstehen, eine Zuschärfung der Kanten bringt ein Tetrakisheptaeder am Würfel zuwege u. a. m.

Verhältnismäßig lange hat es gedauert, bis man auf der Grundlage der kristallographischen Hauptgesetze zu einer Klassifikation der Symmetriegruppen gelangte, die in der Kristallwelt verkörpert sind, obwohl doch nur sehr einfache Momente in Betracht kommen; es sind die Begriffe der Symmetrieebenen, Symmetrieachsen (Gyralen) und das Symmetriezentrum; ja letzteres kann bei den Ableitungen noch ausgeschaltet werden. Zur Beurteilung der Rolle, welche die Symmetrieebenen und Symmetrieachsen im Kristallgebäude spielen, sei herausgehoben, daß ihnen immer der Charakter möglicher Flächen bzw. Kanten zukommt; dasselbe gilt für die Flächen senkrecht zu Symmetrieachsen, ihr Auftreten an Kristallen ist im Einklang mit dem kristallographischen Grundgesetz.

Eine Symmetrieebene teilt einen Kristall in Hälften, die aussehen wie Gegenstand und Spiegelbild. In Fig. 10 ist das am monosymmetrischen Augit erläutert.

Von Symmetrieachsen (Deckbewegungsachsen oder Gyralen) findet man zweierlei: solche einfacher Art (Gyren) und solche zusammengesetzten Wesens (Gyroiden). Dreht man einen Kristall um eine Achse einfacher Symmetrie durch  $\frac{360^\circ}{n}$ , so sind Anfangs- und Endstellung gleich.  $n$  ist die Zahl oder Periode der Gyre; falls  $n = 2$ , also  $\frac{360^\circ}{2} = 180^\circ$  ist, so heißt man die Symmetrieachse zweizählig (Digyre), wenn

Arten der Symmetrieelemente im Kristallbau.

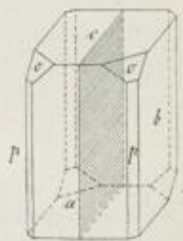


Fig. 10. Augitkristall mit eingezeichneter Symmetrieebene.

Symmetrieebenen.

Gyren.

$n = 3$ , dreizählig (Trigyre) usw. Ersichtlich ist die Vertikalachse in der Fig. 11 eine Trigyre.

Gyroiden.

Die Gyroiden sind Drehspiegelungsachsen, also Achsen zusammengesetzter Symmetrie. Um Anfangs- und Endstellung zur Deckung zu bringen, bedarf es einer Wendung um  $\frac{360^\circ}{n}$  und dazu einer Spiegelung nach einer Ebene senkrecht zur Drehachse. In der Hinsicht ist das Rhomboeder Fig. 11 ein hübsches Beispiel. Eine Drehung um  $\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$  bringt z. B. die Fig. 11 a in die Stellung von 11 b und eine hinzutretende Spiegelung nach der horizontalen Ebene in die Lage von 11 c = 11 a. Die vertikale Trigyre des Rhomboeders ist also zugleich eine Hexagyroide.

Symmetriezentrum.

Ein Symmetriezentrum ist vorhanden, wenn jede Fläche mit der ihr parallelen gleichberechtigt ist, dann sind im Kristall Richtung und Gegenrichtung gleich; Linien durch den Mittelpunkt treffen Gleichartiges an der Oberfläche; z. B. verläuft die Vertikale inmitten des Rhomboeders in entsprechende Ecken des Kristalls. Ohne Symmetriezentrum ist das Tetraeder. Die Flächen haben keine Parallelflächen.

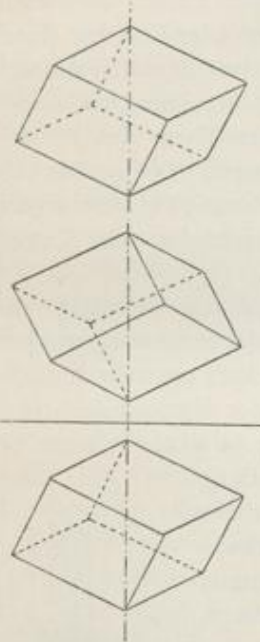


Fig. 11 a, b, c. Erläuterung der Drehspiegelung an einem Rhomboeder.

Höhe der kristallographischen Symmetrie.

Einengung, insofern als an Symmetrieebenen nur in die Erscheinung treten je 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 oder keine, an Symmetrieachsen nur 2-, 3-, 4- und 6-zählige, also Di-, Tri-, Tetra- und Hexagyralen. Diese Beschränkung liegt im kristallographischen Grundgesetz der Rationalität der Indizes begründet, dem z. B. eine fünfzählige Symmetrieachse widersprechen würde.

Zahl der kristallographischen Symmetrieklassen.

Durch mathematische Folgerungen aus dem kristallographischen Grundgesetz wurde schon 1830 von J. Chr. Fr. Hessel erwiesen, daß 32 Kristallgruppen mit verschiedener Symmetrie im Rahmen der Kristallographie möglich sind.

Das sind also die sehr einfachen Elemente, von denen man gefunden hat, daß sie der mannigfachen Körpersymmetrie der Kristallwelt zugrunde liegen; sie sind natürlich auch bestimmend für die Symmetrie in der Umrahmung der Kristallflächen. Wesentlich für diese Symmetrie in der Ebene ist es, ob und wieviel Symmetrieebenen des Kristallkörpers auf einer Fläche senkrecht stehen, weiterhin ob ihre Normale eine Symmetrieachse ist und falls ja, von welchem Grade. In der Hinsicht sei eine Fläche des Würfels Beispiel. Man erkennt unmittelbar, daß ihre Symmetrie gekennzeichnet wird durch vier zu ihr senkrechte Symmetrieebenen und eine lotrechte Tetragyre.

Vor allem wichtig war es aber bei der Erkundung der Bauart im anorganischen Reiche zu wissen, wie hoch die Symmetrieverhältnisse in der Kristallwelt steigen.

In der Hinsicht ergab sich eine ganz charakteristische

Über ein halbes Jahrhundert aber blieb seine grundlegend wichtige Studie den Kristallographen unbekannt. Es lag das am versteckten Ort der Veröffentlichung und an der etwas schwerfälligen Art der Darlegungen Hessels. In anderer Art kamen A. Bravais (1849), A. Gadolin (1867), P. Curie (1884), B. Minnigerode (1886) u. a. zum nämlichen Resultat. Bekannt sind von den 32 Kristallklassen bereits 31, andererseits ist keine gefunden, die der obigen Beschränkung sich nicht fügte.

Es kommen also für die kristallographischen Betrachtungen nicht alle möglichen regelmäßigen Raumgruppen in Betracht, sondern zufolge des den Kristallen eigenen Wesens, das sich im Haüy'schen Grundgesetz ausdrückt, 32. Eine jede Klasse vereinigt kristallisierte Körper mit bestimmten gemeinsamen Symmetrieverhältnissen. Ein Überblick über diese eingeengte und dabei doch so mannigfaltige Formenwelt sei dem Leser weiter unten dargeboten, nach Kenntnisnahme der höchst praktischen einfachen und übersichtlichen Art, in welcher die Mineralogen in bräuchlicher Weise die Ornamentik von Kristallen im Projektionsbilde darstellen.

VII. Projektion der Kristallgestalten. Unter den methodischen Mitteln des Kristallerforschers spielt die „Projektion“ eine Hauptrolle. In der Tat wird die Übersicht der Flächen, des Zonenverbandes und der Symmetrieverhältnisse eines Kristalls durch seine projektionsmäßige Wiedergabe ganz außerordentlich erleichtert. Es handelt sich dabei um eine Darstellung zunächst der Hauptbauelemente, also der Flächen, durch Linien oder Punkte. Eine früher hierfür viel verwandte Linienprojektion rührt von F. E. Neumann (1798—1895) her; sie wurde von G. Rose (1827) aufgenommen und insbesondere von F. A. Quenstedt (1835) eingehend dargelegt und gepflegt, nach dem sie auch oft benannt wird. Bei

dieser Quenstedtschen Projektion wird zumeist eine Achsenebene zur Projektionsfläche genommen. So möge sie denn in Fig. 12b, die den triklinen Feldspat der Fig. 12a darstellt, die Durchschnittskanten  $c : b$  und  $c : x'$  als Achsen  $a$  und  $b$  in sich bergen. Die Achse  $c$ , gegeben als Kante  $p' : p$  denkt man sich vom Schnittpunkt  $M$  schräg nach oben ziehend. Man berücksichtigt im allgemeinen nur den über der Projektionsebene liegenden Kristallteil. Die Projektion besteht aus den Schnittlinien der darzustellenden Flächen mit der Projektionsebene; dabei ist die Regel zu befolgen, jede Fläche soweit sich selbst zu verschieben, bis sie die Achse  $c$  in deren Einheit durchzieht. Handelt es sich um eine Gestalt  $a : b : c$ , so ist also eine solche Lagenveränderung nicht nötig; eine Linie von  $a$  nach  $b$  stellt die

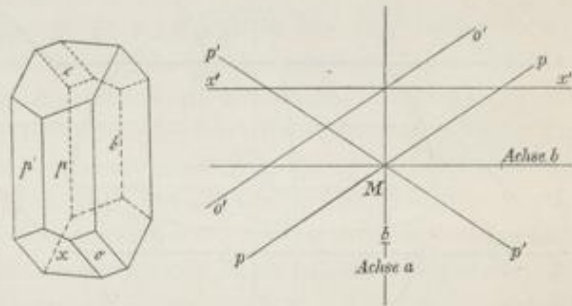


Fig. 12a und 12b. Zeichnung und Quenstedtsche Projektion eines triklinen Feldspats.

Linienprojektion.

Projektion dar. Hingegen wäre z. B. bei  $\frac{1}{2} a' : b : \frac{1}{3} c$  eine Verlegung nach  $\frac{3}{2} a' : 3 b : c$  vorzusehen. Eine Linie von  $\frac{3}{2} a'$  nach  $3 b$  wäre die gesuchte Projektion. Verläuft eine Fläche der Achse  $c$  parallel, so ist sie bis zum Projektionsmittelpunkt zu führen. Dann liegt natürlich die ganze Achse  $c$ , mithin auch der Einheitspunkt in ihr: die Regel ist befolgt.

In ausgezeichnete Klarheit tritt der Zonenverband durch den Umstand heraus, daß sich die Projektionslinien aller tautozonalen Flächen in einem Punkte schneiden, z. B. aller längs der  $c$ -Achse laufenden Ebenen im Projektionszentrum  $M$ . Parallele, d. h. sich in der Unendlichkeit treffende Projektionslinien besagen gleichfalls Zonengemeinschaft.

Jede Zone ergibt einen Zonenpunkt. Liegt eine Fläche in zwei Zonen, so geht ihre Projektionslinie durch die beiden Zonenpunkte; sie läßt sich also auf Grund dieser Eintragung leicht ableiten, indem man die Schnitte auf den Achsen  $a$  und  $b$  in der Projektion abmißt oder berechnet und weiterhin bedenkt, daß  $c$  von ihr im Einheitspunkt durchschnitten wird bzw. Zonenachse ist.

Punktprojektion.

Bei den Punktprojektionen, die man gleichfalls F. E. Neumann verdankt, handelt es sich um die Wiedergabe einer Polfigur auf einer Ebene. Diese Figur wird auf einer mit dem Kristall konzentrischen Kugel erhalten in den Durchstichen von Loten, die vom Mittelpunkt des Kristalls auf seine Flächen gefällt werden.

Es macht sich also hier die schon von Bernhardt (1807) betonte Wichtigkeit der Flächennormalen zur Kennzeichnung der Flächenlage geltend. Natürlich gewinnt man den nämlichen Flächenpol, wenn man die betreffende Kristall-

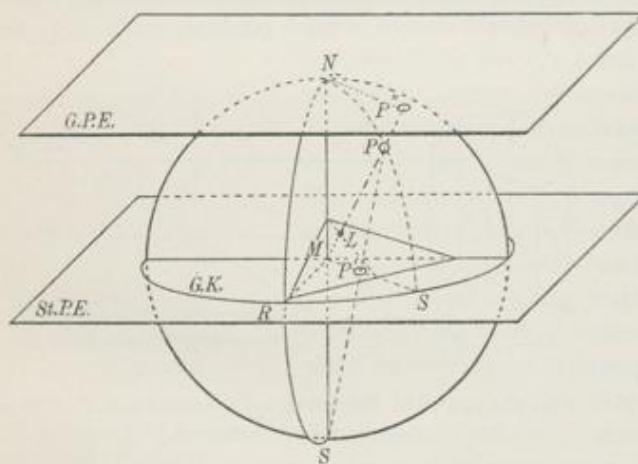


Fig. 13. Erläuterung der stereographischen und der gnomonischen Projektion.

Stereographische  
Punktprojektion.

Bei der stereographischen Wiedergabe geht die Projektionsebene durch den Kugelmittelpunkt. Sie möge horizontal angenommen werden. Auf ihr, dem Grundkreise G. K. der Fig. 13, ergeben sich die Projektionen durch geradlinige Verbindung der Polfigurpunkte  $P$  mit dem Tiefsten  $S$  der Kugel. Die

bis zur Tangierung mit der Kugel verschiebt. Hat man so die Schar der Lote auf den Kristallflächen, nach Bedarf auch andere Richtungen, in der Polfigur dargestellt, so gilt es nunmehr, diese Figur auf eine schicklich gewählte Ebene zu projizieren. Dafür sind von F. E. Neumann mehrere Weisen angegeben und auch jetzt noch in der kristallographischen Praxis üblich.

Durchstiche  $P'$  dieser Geraden auf dem Grundkreis bilden die gesuchten Projektionen. Die Pole der oberen Kugelhälfte stellen sich innerhalb des Grundkreises dar; die Projektionen der vertikalen Flächen liegen auf ihm, die der unteren Kugelhälfte befinden sich außerhalb seines Bereiches. Man kann sie aber auch innerhalb des Projektionskreises zur Darstellung bringen, indem man in Gadolinscher Art die Pole der unteren Halbkugel mit dem oberen Kugelpol verbindet.

Folgende geometrische Umstände machen die stereographische Projektion zu einem äußerst wertvollen, einfachen kristallographischen Hilfsmittel.

1) Alle Kreise auf der Kugel ergeben in ihrer stereographischen Projektion wieder Kreise. 2) Die Winkelverhältnisse auf der Kugel lassen sich aus der Projektion ablesen. 3) Die Projektion eines sphärischen Dreiecks der Kugel ergibt ein entsprechendes Dreieck, in welchem die Seiten das Maß sind für den Winkel der Lote auf den Kristallflächen und in dem die Winkel das Supplement der Kantenwinkel der drei Flächen zu  $180^\circ$  angeben. 4) Die Polfigur einer beliebigen Zone, kontinuierlich gedacht, kennzeichnet sich durch einen Großkreis, somit ist die Projektion eines Zonenkreises nach Satz 1) wiederum ein Kreis, und zwar geht er durch zwei sich diametral gegenüberliegende Punkte des Grundkreises. Die Projektion der Zonenachse steht natürlich um  $90^\circ$  von jedem Punkte des Zonenkreises ab.

Zu dieser Einfachheit der Wiedergabe von architektonischen Verhältnissen der Kristalle kommt nun noch, daß die Anfertigung und Verwertung der stereographischen Projektion ganz außerordentlich erleichtert werden kann, wenn man, statt geometrische Konstruktionen auszuführen (über die man ev. in Lehrbüchern nachsehen möge), sich eines von B. Hecht (1893) und G. Wulff (1902) vorgeschlagenen Hilfsnetzes bedient.

Wulffsches Netz  
zur Herstellung  
von Projektions-  
bildern.

Die gnomonische Projektion F. E. Neumanns hat eine reiche Anwendung besonders bei den Studien von V. Goldschmidt und seinen Schülern gefunden. Kennzeichnend ist daß die vom Krystallmittelpunkte gefällten Flächenlote unmittelbar auf einer Projektionsebene aufgefangen werden; man benutzt als solche zumeist die den obersten Kugelpunkt  $N$  tangierende horizontale Fläche  $G. P. E.$  (Fig. 13 S. 564); auf ihr stellen die Durchstichpunkte  $P''$  der Flächenlote die Projektionspunkte dar. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß nunmehr die Projektionspunkte einer Zone auf einer Geraden liegen, wodurch eine sehr einfache Übersicht dieses wichtigen Umstandes gegeben ist. Eine Fläche in zwei Zonen ergibt sich leicht im Durchschnittspunkte der Zonengeraden. Somit projiziert sich eine horizontale Fläche im Mittelpunkt der Projektionsfigur; die Projektionen vertikaler Ebenen fallen in die Unendlichkeit, können also nicht dargestellt werden. Man deutet sie durch Pfeile auf Richtungslinien an. Zur bequemeren Eintragung und Benutzung der Punkte kann man ein Hilfsnetz verwenden, das Hilton (1904) entworfen hat.

Gnomonische  
Projektion.

VIII. Kristallzeichnungen. Die Durchsicht der mineralogischen Literatur zeigt eine Fülle schöner Zeichnungen oft reich mit Flächen geschmückter Kristalle, an deren Wiedergabe auch ein Künstlerrauge Gefallen finden würde.

Meister in der Hinsicht waren und sind z. B. J. B. Romé de l'Isle, R. J. Haüy, F. Mohs, Chr. S. Weiß, A. Schrauf, B. A. M. Sadebeck, K. F. Naumann, P. Groth, J. Strüver, G. v. Rath, V. Goldschmidt, S. L. Penfield u. a. m.

Bei der Strenge kristallographischer Formen lassen sich insbesondere idealisierte Zeichnungen verhältnismäßig leicht herstellen; ein ausgezeichnetes Hilfsmittel sind dabei die projektionsmäßigen Darstellungen der Kristalle, mit ihren die Gestalten versinnbildlichenden Linien oder Punkten, aus denen sich die Figuren entweder in perspektivischen Bildern oder in einer flachen Projektionsart gewinnen lassen. Bei den perspektivischen Figuren gibt man die parallelen Kristallkanten im Gleichverlauf wieder, denkt sich also den Augenspunkt unendlich weit entfernt.

IX. Kristallberechnung. Zur allgemeinen Orientierung des Lesers über die üblichen geometrisch-kristallographischen Berechnungen genügen wenige Hinweise. Auch auf diesem Gebiete ist mehr und mehr eine Verallgemeinerung und außerordentliche Vereinfachung der Methoden möglich geworden, zumal durch Anwendung der stereographischen Projektion. Es sei im übrigen bei der Gelegenheit vermerkt, daß diese schöne und einfache Symbolisierung der Kristallformen auch eine schnelle graphische Ermittlung von kristallonomischen Zahlen gestattet, wenn es auf eine Genauigkeit nach Minuten und zweiten Dezimalen nicht ankommt. Von Interesse sind in der Hinsicht instrumentelle Vorrichtungen, an denen man mit großer Sicherheit früher rechnerisch ermittelte kristallographisch wichtige Umstände ablesen kann, z. B. solche zur Auflösung sphärischer Dreiecke. Auch mit Hülfe gnomonischer Projektion lassen sich einschlägige Aufgaben leicht lösen.

Hauptaufgabe  
der Kristall-  
berechnung.

Bei der Kristallberechnung kommt es wesentlich darauf an, aus Messungen von Winkeln die Grundmaße, also das Achsenverhältnis festzustellen und die Indizes der am Kristallbau auftretenden Flächen zu erkennen.

Legen wir den allgemeinen Fall eines triklinen Systems zugrunde, so ist zur Ermittlung der Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  zwischen den drei Achsen und ihres Längenverhältnisses  $a : b : c$  die Kenntnis von fünf unabhängigen Angularmessungen nötig. Bei den Systemen mit höher symmetrischem Achsenkreuz verringert sich diese Zahl nach dem Maße der schon von Natur aus gegebenen Konstanten und zwar im monoklinen System auf 3, im orthotrimetrischen auf 2, im trigonalen, tetragonalen und hexagonalen auf 1 und im isometrischen System auf 0; in letzterem sind die Grundmaße  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ;  $a : b : c = 1 : 1 : 1$ .

Eine früher vielgeübte einfache, zwar etwas umständliche, indes wegen der nötigen Raumvorstellungen für den Anfänger recht lehrhafte Methode der Kristallberechnung besteht in der Verwertung von Winkeln, welche von Fläche zu Fläche gemessen sind, mittels sphärischer Dreiecke, die man um die Kristallecken legt, und in denen man zur Weiterführung der Rechnung nötige Stücke ermittelt. Man geht dann in die ebenen Dreiecke über, die das Achsenkreuz in Verbindung mit passenden Kristallkanten liefert, und gewinnt so die Grundmaße des Kristalls. Dabei werden die Verhältnisse natürlich um so einfacher, je

regelmäßiger das Achsenkreuz ist. Besonders C. F. Naumann und C. Klein haben in ihren Lehrbüchern diese Art der Berechnung in ausführlichster Art erörtert.

Eine zweite Methode wurde auf die Ausnutzung stereographischer Projektionen gegründet, deren sphärische Dreiecke, wie S. 565 vermerkt ist, Flächen und Kantenwinkel der Kristalle in sich schließen. Aus bekannten Stücken können daher mit Hilfe sphärischer Trigonometrie unbekannte berechnet werden, gleichwie das Achsenverhältnis und die Größe der Indizes sich aus einfachen Beziehungen ergeben.

Besonders bündig stellt sich die Rechnung bei Benutzung der Längswinkel und Polardistanzen der Flächen. (Vgl. S. 555.) Es lassen sich dann die wichtigsten Operationen der Kristallberechnung mit wenigen Formeln bewältigen, worüber nähere Erörterungen z. B. bei G. Wulff (Zeitschr. f. Kristallographie 1902) oder auch bei H. E. Boeke (1911, Anwendung der stereographischen Projektion) nachzulesen sind.

X. Allgemeine Übersicht der Systeme und Klassen der Kristalle. Herleitung der Kristallklassen.  
Die Ableitung der sieben Kristallsysteme und der in ihrem Rahmen möglichen 32 Klassen ist ein besonderer Fall der allgemeineren Aufgabe, sämtliche theoretisch mögliche Verbindungen von Symmetrieeigenschaften ausfindig zu machen, mit anderen Worten alle denkbaren regelmäßigen Punktsysteme zu bestimmen. Seine eigene Art erhält das Problem im anorganischen Reiche der Natur durch die Beschränkung, die das kristallographische Grundgesetz mit sich bringt, unter dessen Zwange, wie erwähnt, in der Formenwelt der Kristalle insbesondere nur 2-, 3-, 4- oder 6-zählige Symmetrieachsen möglich sind.

An der Lösung der allgemeinen mathematischen und der spezielleren kristallographischen Aufgabe haben sich viele Forscher versucht; es seien insbesondere W. Barlow, H. Baumhauer, F. Becke, A. Bravais, P. Curie, E. v. Fedorow, Ch. Friedel, A. Gadolin, P. v. Groth, J. F. Ch. Hessel, Th. Liebisch, B. Minnigerode, C. Rohn, E. Sommerfeldt, G. v. Tschermak, C. Viola genannt. Die erste vollständige Ableitung der Kristallklassen wurde 1830 von J. F. Ch. Hessel (1796—1872) ausgearbeitet. Es ist hier nicht der gegebene Ort, den speziellen Darlegungen dieser Forscher zu folgen. Nach der Herauskehrung des gemeinsamen Ergebnisses, daß 32 durch verschiedene Symmetrie gekennzeichnete Kristallklassen möglich sind, ist es vielmehr die nächste Aufgabe, die Mannigfaltigkeit der kristallographischen Welt in ihrer Ordnung nach Systemen (Syngonien) vorzuführen, die sich als Hauptabteilungen ergeben haben. Es sind ihrer sieben: die triklone, monokline, orthotrimetrische (rhombische), trigonale, tetragonale, hexagonale und isometrische (reguläre) Bauart. Eine jede Syngonie ist gewissermaßen durch ein besonderes inneres Baugerüst, das Achsenkreuz, gekennzeichnet, ausgenommen das trigonale und das hexagonale System, die auf ein gemeinsames Achsenkreuz bezogen werden können.

Das Wesen zunächst der triklinen Bauweise tritt im Achsenkreuz der Fig. 14a

Die sechs Achsenkreuze.

heraus; es ist aus drei ungleichen, schief zueinander verlaufenden Armen zu-

sammengesetzt. Schon höher symmetrisch zeigt sich Fig. 14b als Symbol des monoklinen. Auch hier sind  $a$ ,  $b$ ,  $c$  verschieden, aber nur  $a$  und  $c$  stehen schräg aufeinander,  $a$  und  $\gamma$  bilden  $90^\circ$ . Ähnlich, nun aber auch mit  $\beta = 90^\circ$  stellt sich das orthotrimetrische oder rhombische (Fig. 14c) dar. So ist denn nicht zu verkennen, daß diese drei Baustile Verwandtschaftszüge zeigen; ihr Achsenkreuz ist trimetrisch. Die Unterschiede liegen in seiner unsymmetrischen, monosymmetrischen und orthotrimetrischen Art.

Mit einer anderen allgemeinen Physiognomie treten dem Beschauer die trigonalen, tetragonalen und hexagonalen Gebilde entgegen. Sie lassen sich auf ein dimetrisches Baugerüst beziehen, in dem eine gebräuchlicher Weise vertikal gestellte Achse eine im Kristall sich nicht wiederholende Richtung  $c$  darstellt; sie wird mit Recht die Hauptachse genannt. Im trigonalen System ist  $c$  eine Trigyre, im tetragonalen herrscht in ihr als Tetragyre oder Tetragyroide die

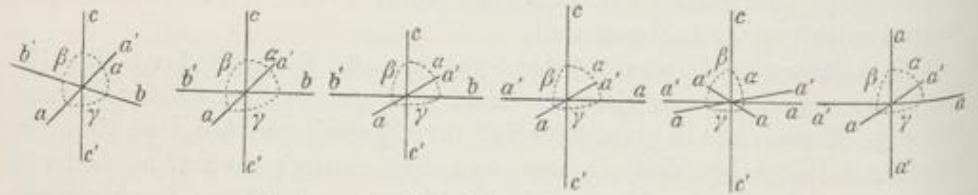


Fig. 14a—f. Achsenkreuze der Kristallsysteme.

Vierzahl, im hexagonalen System stellt sie sich als Hexagyre dar. Das zweite Maß, gegeben durch die horizontalen Nebenachsen  $a$ , wiederholt sich in regelmäßiger Aufteilung des Horizontalschnittes, wie es die Fig. 14d und e zeigen. Schließlich ist die prächtige Mannigfaltigkeit des isometrischen Systems zurückzuführen auf ein höchst einfaches Achsenkreuz, das, wie Fig. 14f vorführt, aus drei gleichen, senkrecht zueinander stehenden Armen besteht.

Die fünf  
Prinzipien kri-  
stallographischer  
Ornamentik.

Die nächste Aufgabe liegt auf der Hand. Es gilt jetzt die Baugerüste mittels einer Ornamentik durch Flächen und Flächenkombinationen zu umkleiden. Das läßt sich nach G. v. Tschermak im stufenweisen Aufbau unter die Herrschaft von zunächst fünf Prinzipien bringen. Zuerst besteht die kristallonomische Möglichkeit, daß jede Fläche für sich, ganz unabhängig von andern, dasteht. Offenbar handelt es sich dann um die niedrigst symmetrische Stufe. Weiter aber mag sich zu jeder Fläche eine parallele Gegenfläche gesellen; oder es findet sich eine Fläche hemitrop wieder, d. h. sie deckt sich mit einer zweiten, wenn eine  $180^\circ$ -Drehung um eine zur Durchschnittskante senkrechte Achse ausgeführt ist, auch kann eine Fläche spiegelbildlich wiederkehren, und schließlich ist es möglich, daß sie und ihr Spiegelbild mit parallelen Gegenflächen ausgestattet sind.

Figürlich stellen sich diese fünf Formen der Flächenanlage anschaulich so vor, wie es die Fig. 15 zeigt.

Eine nähere Betrachtung lehrt, daß die fünf elementaren Stufen der Kristallornamentik die zwei Klassen des triklinen und die drei des monoklinen Systems versinnbildlichen. In den hinsichtlich ihres Zonenbaues immer



mannigfacher sich gestaltenden übrigen Kristallsystemen kehren die fünf Typen sich am selben Kristalle wiederholend, wieder. Alles zusammen bildet die Reihe der 32 Bauarten in der anorganischen kristallinen Welt.

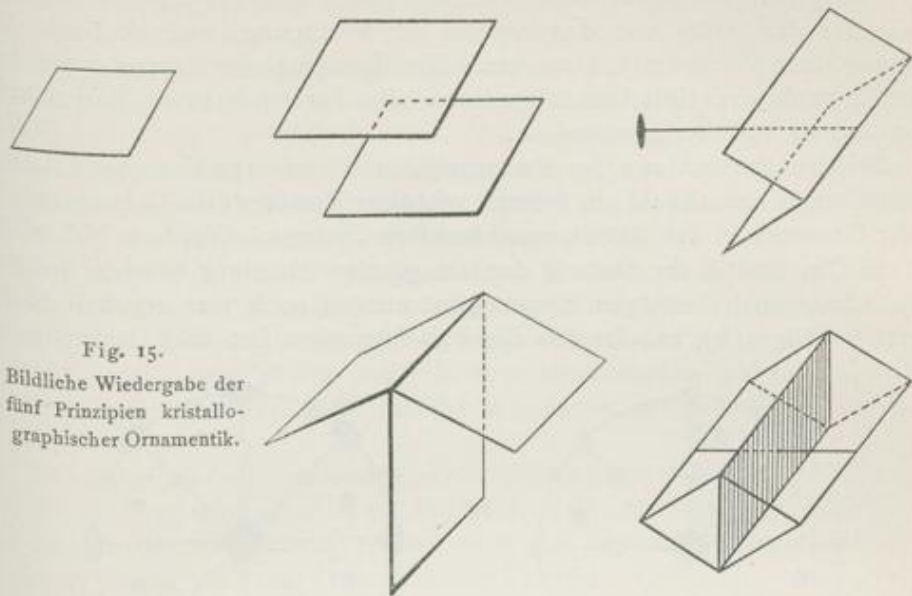


Fig. 15.  
Bildliche Wiedergabe der  
fünf Prinzipien kristallographischer Ornamentik.

XI. Kristallformen innerhalb der Klassen. Um das Endziel zu erreichen, d. h. die Flächen in ihrem ganzen Wechsel der Erscheinungen, wie er in den 32 Klassen jeweils möglich ist, zu entfalten, ist nur nötig, einen figurativen Punkt, der in den Projektionsbildern der Fig. 16 durch einen Kreis gegeben ist, in alle möglichen charakteristisch verschiedenen Stellen des sphärischen Dreiecks wandern zu lassen, das ihn umschließt; das sind natürlich die Lagen auf den drei Seiten des Dreiecks, in seinen drei Ecken und im Innern des Feldes. Stets sind somit sieben Fälle gegeben. Läßt man alsdann die Symmetrie der betreffenden Kristallklasse walten und trägt die ihr entsprechenden weiteren Pole in das Projektionsbild ein, so entstehen in einfachster Anschaulichkeit die jeweils sieben Formen der Gruppe.

Als Beispiel für diese kristallographische Formenentwicklung möge die Stufe II des tetragonalen Systems erörtert werden, deren Bauregel in Fig. 16a gekennzeichnet ist. Danach herrschen in diesem Stil als Symmetrieelemente die erzeugende Tetragyre und eine horizontale Symmetrieebene. Ein kleinster durch eines der acht Dreiecke bestimmter Bauteil diene als Ausgang, und so wandere der darstellende Punkt in die Lage 1 als Repräsentant zur Tetragyre senkrechter Flächen. Der Erfolg ist die pinakoidal gestaltete tetragonale „Basis“. Die Lage 2 gleichwie 3 und 4 verlangen vierfache Gruppierung der nun vertikal stehenden Flächen, wie es die in tetragyrischer Wiederholung gesetzten Punkte angeben: die Ergebnisse sind das tetragonale Prisma erster Stellung (2), zweiter Stellung (3) und dritter Stellung (4). In Lage 5 liefert der tetragyrisch wiederholte

und nach der horizontalen Symmetrieebene gespiegelte Punkt eine tetragonale Bipyramide erster, in Lage 6 eine solche zweiter und in Lage 7 eine dritter Stellung.

Alle diese allgemeinen Formen sind in der Stufe II des tetragonalen Systems möglich. Natürlich stehen zur Ornamentik im besonderen eine große Schar der drei Arten von Bipyramiden zur Verfügung, wechselnd mit der Neigung ihrer Flächen zur Tetragyre. Eine Beschränkung ist nur durch das kristallographische Grundgesetz gegeben: alle Formen müssen Rationalität ihrer Indizes zueinander aufweisen.

Gemeinsamkeit  
von Formen  
in verschiedenen  
Kristallklassen.

Bei der Entwicklung des Formenreichtums der verschiedenen Kristallklassen zeigte sich alsbald ein weiterer wichtiger Umstand: die Gemeinsamkeit vieler Gestalten in den Abteilungen desselben Systems. Würde es sich z. B. um die Ornamentik der Stufe V der tetragonalen Abteilung handeln, bei der außer den soeben benutzten Symmetrieelementen noch vier vertikale S. E. herrschen (Fig. 16b), so wäre das Ergebnis folgendes: Der nach der nunmehr

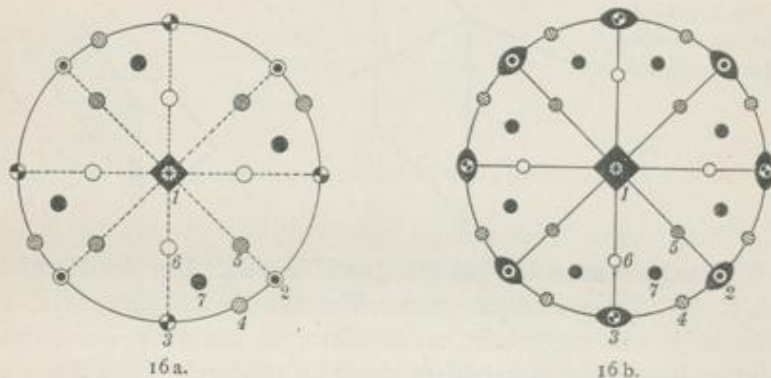


Fig. 16a und 16b. Entwicklung der Kristallformen im Rahmen der Stufe II und V des tetragonalen Systems.

gültigen Bauregel wiederholt gruppierte Punkt 1 ergibt wie vorhin eine pinakoidale Basis; 2 und 3 liefern abermals tetragonale Prismen und 5 sowie 6 Bipyramiden wie vorhin; 4 und 7 aber lassen neue Gestalten entstehen: ditragonale Prismen bzw. ditragonale Bipyramiden.

Oberflächen-  
beschaffenheit  
von Kristallen  
als Hinweis auf  
die obwaltende  
Symmetrie.

Daraus erhellt, daß sich aus der Ornamentik eines Kristalls nicht immer erschließen läßt, welcher Symmetriegruppe er angehört. Ein Kristallbau z. B. mit den durch die Punkte 1 2 3 und 5 gekennzeichneten Formen ist beiden erörterten Klassen gemeinsam. Erst das Auftreten von Gestalten 4 bzw. 7 würde näheren Aufschluß darüber geben, ob Stufe II oder V vorliegt. In solchen Fällen der Mehrdeutigkeit hilft zuweilen die Beobachtung der Flächenbeschaffenheit, die wahre Symmetrie ergründen. Z. B. findet man an den Würfeln des Eisenkieses häufig eine Streifung, die auf jeder Fläche längs einem Kantenpaar geht, ein deutliches Zeichen, daß dem Gebilde nur drei senkrecht aufeinanderstehende Symmetrieebenen zukommen. Versagen solche Studien der Oberflächenbeschaffenheit, so decken physikalische Untersuchungen die Symmetrieverhältnisse auf. Später wird von solchen Methoden die Rede sein.

Es ist natürlich hier, wo es sich um Darlegungen allgemeiner Verhältnisse handelt, nicht der Ort, alle die Formen zu schildern, mit denen die Natur die Glieder der Kristallklassen schmückt. Immerhin sei eine kleine Folge von Gestalten gewürdigt, die sich in den kristallographischen Gruppen in niedriger und immer höher symmetrischer Art zur Schau stellt.

Das einfachste, was zur kristallographischen Ornamentik dient, ist die für sich selbständige Fläche. Man nennt sie ein Pedion. Natürlich besteht sie in Wirklichkeit nicht für sich; eine volle Raumumschließung, der tatsächliche Bestand eines rundum durch Flächen geschlossenen Kristalls also, ist erst durch mindestens vier pediale Formen gegeben. In der Tat aber hat man Stoffe kennen gelernt, es sind die der ersten (asymmetrischen) Stufe des triklinen Systems, die sich lediglich in dieser recht eigenartigen geometrischen Weise geben. In höher symmetrischen Klassen kehrt übrigens das einfache kristallographische Ornament des Pedions neben reicher ausgestalteten Formelementen wieder, so in zwei monoklinen Stufen, sowie im orthotrimetrischen und in den wirteligen Systemen. Natürlich fehlt in solchen Gruppen mit pedialen Formen ein Symmetriezentrum.

Beispiel von  
Kristallformen.

Das nächst höhere Formelement im Kristallbau ist die Vereinigung von Fläche und Gegenfläche; man nennt es ein Pinakoid. Seine erste und zwar ausschließlich herrschende Verwendung erfährt es in der zentrosymmetrischen „pinakoidalen“ Klasse, der Stufe II des triklinen Systems. Aber auch sonst erscheint es vielfach gewissermaßen als zweiflächige Abschlußform, so im orthotrimetrischen und in den vielen wirteligen Bauten.

Der Typus des einfachen Sphenoids, eines Flächenpaares mit einer Digyre senkrecht zur gemeinsamen Kante, ist wenig verbreitet. Es erscheint nur im monoklinen System. Fast ebenso selten verwandt findet man im Kristallbau die einfache domatische Form, die sich als spiegelungssymmetrisches Flächenpaar kennzeichnet. Es kommt in zwei Klassen des monoklinen und orthotrimetrischen Systems zur Geltung. Eine häufige Erscheinung hingegen ist das aus vier tautozonalen Flächen rhombischen Querschnitts gebaute Prisma. Mit den Pinakoiden bringt es die ganze prächtige Fülle der so sehr häufigen höchstsymmetrischen monoklinen Bauart zuwege, und auch im orthotrimetrischen System erscheint es als eins der Hauptornamente.

Im übrigen sind diese einfachen Gestalten des Pedions, Pinakoids, Sphenoids, Domas und Prismas auch das Mittel der kristallographischen Ausgestaltung in den höher symmetrischen Gruppen; dem gesteigerten Symmetrierhythmus entsprechend verbinden sie sich hier zu neuen Gestalten. So gibt das schräg zur Hauptachse gelagerte Pedion in trigyrischer Wiederholung eine trigonale Pyramide und entsprechende Formen in anderen Systemen. Gesellt sich zur Wirtelachse eine zu ihr senkrechte Symmetrieebene, so wandelt sich das einfache, dreifach wiederholte Pedion in eine trigonale Doppelpyramide um, herrscht aber anstatt der Trigyre eine Hexagyroide, so entsteht ein Rhomboeder.

Entsprechend ist es in allen anderen Fällen der kristallographischen Formenwelt. Je höher die Forderungen der Symmetrie sich stellen, um so reicher wird

die Gruppierung der Flächen als Bauelementen der vollen Figur. Ist es auf der Stufe I des triklinen Systems die Einzelfläche, die der Ausgestaltung dient, so werden es in der monoklinen Bauart im Höchsthalle bereits vier, im orthorhombischen System acht, im trigonalen zwölf, im tetragonalen sechzehn, im hexagonalen vierundzwanzig und im isometrischen achtundvierzig. Die Hexakisoktaeder dieses Systems stellen gewissermaßen die höchste Prachtentfaltung im anorganischen Reiche vor. Wird eine Fläche (hkl) am Achsenkreuz der Gruppe V des isometrischen Systems angelegt, so zieht sie nach den Forderungen der Symmetrie dieser Klasse 47 Schwesterflächen nach sich.

Recht anschaulich kommt das bei den räumlichen Winkelspiegeln zur Geltung, wie sie von A. F. Möbius (1849) erdacht und von E. Heß (1883) in die Kristallbetrachtung eingeführt wurden. Neuerdings hat sie E. A. Wülfing in schönen großen Formaten herstellen lassen und für den Unterricht empfohlen. Sie bestehen aus zueinander nach den Symmetriegesetzen geneigten Spiegeln, in deren Eckräume man entsprechende Flächen stellt. Es ist dann in der Tat außerordentlich überraschend zu sehen, wie sich in solchem Kaleidoskop die Kristallgestalten durch regelmäßigen Reflex in schönster Vollendung darbieten, etwa der Achtundvierzigflächner beim Einschieben eines einzigen Dreiseits in eine Ecke der neun Symmetrieebenen des isometrischen Systems. Natürlich sind im Kaleidoskop nur Kristallgestalten darstellbar, die Spiegelebenen besitzen.

Beschränkung  
der Kristall-  
ornamentik  
durch das Gesetz  
der rationalen  
Indizes.

So mannigfach aber schon nach obigen kurzen Darlegungen die wundervolle Welt der Kristallformen erscheint, so ist sie doch nicht jeder Variation fähig: die straffe Ordnung des Haüy'schen Grundgesetzes schließt alles an Gestalten aus, was der Rationalität der Indizes nicht entspricht. Das tritt besonders auffällig beim Wirtelbau in die Erscheinung, dessen Rhythmus nur nach dem Drei-, Vier- oder Sechsmal geordnet ist. Ein Prisma mit fünf Flächen ist ausgeschlossen, gleicherweise z. B. das platonische Pentagondodekaeder, das Pentagonyren besitzt, die auf den regelmäßigen Fünfecken der Umgrenzung senkrecht stehen. Bereits Haüy hat das erkannt.

Auch die Frage, ob nicht ein regelmäßiges Achteck oder Zwölfeck als Querschnittsform einer wirteligen Kristallgestalt beobachtet wird, ist zu verneinen. Hier hat sich die Natur im Reiche der Kristalle durch das Gesetz der Rationalität der Indizes selbst gebunden.

Voll-, Halb-,  
Viertel- und  
Achtflächigkeit.

XII. Holoedrie, Meroedrie und ihre Ermittlung. Schon J. Bernhardt (1807) bemerkte, daß gewisse Formen, z. B. Pyramidenwürfel und Pentagondodekaeder des isometrischen Systems, so zueinander in Beziehung stehen, daß die eine Gestalt gewissermaßen die Halbform der anderen ist. Man gelangt zum Pentagondodekaeder durch regelmäßiges Auslassen der Hälfte der Flächen des Pyramidenwürfels. Natürlich kann man aus ihm auf die Weise zwei Halbformen ableiten, je nach Wahl der Flächenhälfte. Entsprechend liefert, wie Fig. 17 zeigt, das Oktaeder zwei regelmäßige Tetraeder usw.

Chr. E. Weiß und K. F. Naumann haben diese merkwürdigen Beziehungen der Kristallgestalten zueinander umfassend studiert. Kennzeichnet

nach ihnen der volle Körper die Holoedrie, so kann man die Erscheinung der Teilformen Meroedrie und insbesondere die der Halbformen Hemiedrie nennen. Auch der sog. Hemimorphismus läßt sich füglich hierher rechnen; bei ihm bezieht sich die Auswahl halb und halb auf die Enden einer Symmetrieachse, die durch diese Art von Hemiedrie heteropolar wird.

Weiterschreitend, von der Hälfte wiederum die Hälfte nehmend, kommt man in gewissen Fällen zu einer Viertelflächigkeit (Tetartoedrie), und rechnet man das trigonale System als Hemiedrie zum hexagonalen, so läßt sich auch durch die Halbierung des Viertels eine Achtelflächigkeit (Ogdoedrie) verwirklichen. Auf diese Weise von hoch- zu niedersymmetrischen Klassen übergehend, ist es möglich, aus der Holoedrie der Systeme alle übrigen 25 Gruppen zu entwickeln und miteinander in Beziehung zu setzen. Ob aber dies Verfahren lediglich ein didaktisches Interesse hat, oder das molekulare Wesen der Dinge

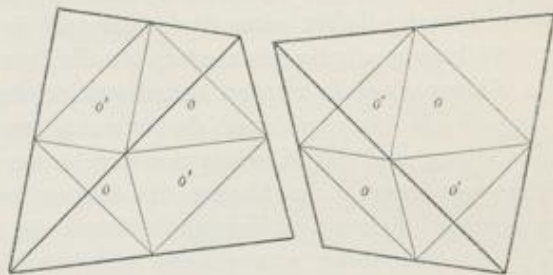


Fig. 17. Ableitung zweier Tetraeder aus dem Oktaeder.

Wesen der Teilflächigkeit.

wird verschieden beurteilt. J. Beckenkamp neigt der letzteren Auffassung zu. Nach seiner der Theorie von Bravais entsprechenden Annahme lagern die Kristallmoleküle in einem holoedrischen Raumgitter, und durch mehr oder minder vollkommene zwillingsmäßige Vereinigung der Teilchen wird eine bestimmte Stufe der Symmetrie im Rahmen des Systems erzielt. Danach wäre die Möglichkeit gegeben, daß Meroedrien bzw. Holoedrien sich mehr oder minder kräftig kundgeben. Auch V. Goldschmidt und Chr. E. Weiß nehmen abgestufte Hemiedrie an. Nach ersterem und v. Fersmann ist z. B. der Diamant nur schwach hemiedrisch. Ja die Stärke der Meroedrie könnte mit den Entstehungsbedingungen an einem und denselben Mineral wechseln.

Von Interesse erscheint in der Hinsicht, daß die Anzahl der zu einer holoedrischen Gruppe gehörigen Stoffe nach den bisherigen Erfahrungen die der meroedrischen Klassen sowohl bei den Produkten der Natur als auch der Laboratorien überwiegt, insbesondere wenn man das trigonale System als holoedrisch auffaßt. Eine Ausnahme macht dabei die vollflächig hexagonale Bauart; sie ist gegenüber der halbflächigen Weise nur selten verkörpert. Indes muß bei dieser gewiß interessanten Frage, welches die durch Häufigkeit bevorzugten Symmetrieklassen der Kristallwelt sind, immerhin noch bedacht werden, daß viele Stoffe auf die etwaige Zugehörigkeit zu einer Meroedrie noch nicht genau untersucht sind. Nicht selten stellen sich teilflächige Substanzen holoedrisch dar, indem sie die für Hemiedrie oder Tetartoedrie kennzeichnenden Flächenornamente nicht tragen. Da erhebt sich aber die wichtige Frage, wie in solchen Fällen die Entscheidung über den Symmetriegrad des Kristallbaues getroffen werden kann. In der Hinsicht ist zu bedenken, daß, wie die geometri-

Verteilung der kristallisierten Körper auf voll- und teilflächige Klassen.

schen Umstände des Wachstums so auch die der Auflösung über solche Symmetriefragen Aufschluß geben können. Man stellt sich also durch den Lösungsprozeß, der sich in das Kristallgebilde in wechselnder Richtung verschieden wirkend hineinarbeitet, neue Ornamente dar, um aus ihnen Schlüsse auf die vorliegende Bauart zu machen.

Ermittlung der geometrischen Symmetrie durch Lösungsvorgänge.

Es handelt sich dabei um Lösungskörper und Ätzfiguren. Zur Herstellung ersterer verwendet man am besten Kugeln, wie das bezüglich Kalkspat von Lavizzari, V. Goldschmidt und F. E. Wright, am Quarz von O. Meyer, S. L. Penfield und A. C. Gill geschehen ist; sie bilden sich zu Körpern um, deren Form die geometrische Symmetrie der Kristallart hervortreten läßt. Beispielsweise liefert eine Steinsalzkugel in wäßriger untersättigter Chlor-natriumlösung ein Ikositetraeder, ein Zeichen also der Holoedrie des Stoffes; aus Kalkspatkugeln werden rhomboedrisch-hemiedrische Gebilde. Aber noch mehr als die Lösungskörper sind die Ätzfiguren zufolge der Einfachheit ihrer Herstellung und der Klarheit der Ergebnisse zum Anhalt in der schwebenden Frage geworden. Sie können im allgemeinen ohne weitere Vorbereitungen an ebenen Flächen von Kristallen hergestellt werden. Meist sind es in großer Zahl nebeneinander entstehende mikroskopisch kleine, regelmäßig geformte Vertiefungen (Ätzgruben) oder Erhabenheiten (Ätzhügel). Die Zerstörung setzt also hierbei eigenartiger Weise an bestimmten Punkten der Gestalt ein, während man doch erwarten sollte, daß die Oberflächenschicht der Kristalle gleichmäßig angegriffen würde. Der Grund für diese örtlich konzentrierte Wirkung des Lösungsmittels liegt wohl in kleinen Unregelmäßigkeiten des Kristallbaues, etwa in submikroskopischen Sprüngen oder Löchern, an denen der Lösungsvorgang beginnt. Vollständig glatte Flächen an Steinsalz oder Quarz lassen in der Tat Ätzfiguren vermissen. Die Ätzhügel oder -vertiefungen haben die nämliche Symmetrie wie die Fläche, auf der sie erscheinen. Gelegentlich kommen allerdings Abweichungen vor, die wohl auf Unregelmäßigkeiten im

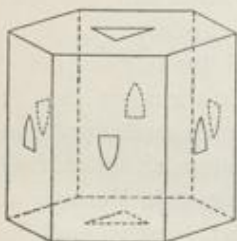


Fig. 18. Ätzfiguren an Kalkspat.

Kristallbau zurückzuführen sind. Im übrigen wechseln die Figuren oft mit dem Lösungsmittel, gelegentlich auch mit der beim Versuch herrschenden Temperatur; ihr Symmetriecharakter bleibt derselbe.

Um ein Beispiel der Verwertung solcher vor allen von H. Baumhauer, F. Becke u. a. studierten Lösungserscheinungen zu geben, sei hier über die Salzsäureätzung am Kalkspat berichtet. Recht oft erscheint er in Form der Fig. 18, die durchaus mit der hohen Symmetrie der holoedrischen Klasse des hexagonalen Systems verträglich ist. Der Versuch zeigt aber, daß nicht, wie dann

vorauszusetzen wäre, eine wagerechte Symmetrieebene und dazu sechs sich rhythmisch wiederholende senkrechte die Geometrie des Minerals beherrschen, vielmehr daß an Symmetrieebenen nur drei vertikale vorhanden sind, denn die Figuren auf der Basis sind trisymmetrisch und die auf den Prismenflächen werden, wie das Bild zeigt, nur durch eine einzige Ebene spiegelbildlich geteilt;

auf den Abschlußflächen oben und unten liegen die Dreiecke verwendet, durch die Kanten der Säule kann keine Symmetrieebene gelegt werden. Als Deckbewegungsachsen treten in ausgezeichneter Deutlichkeit eine vertikale Triygre, die zugleich eine Hexagyroide ist, und drei Digyren senkrecht zu den Prismenkanten heraus; das Symmetriezentrum ist vorhanden.

Noch in anderer Weise haben die Ätzfiguren über die Baueigentümlichkeiten von Kristallen Aufschluß gegeben, insofern sie Verwachsungen, so den Zwillingsaufbau, durch die mit den Individuen wechselnde Lage der Lösungsformen aufdecken. Auch macht sich eine etwaige Aggregierung von Körnern beim Lösungsvorgange gut kenntlich, da der chemische Angriff zunächst an den Grenzen der Teilchen kräftig einsetzt und Umrandungsrillen entstehen läßt.

Wie ein Ätzen wirkt gelegentlich eine Entwässerung; so findet man es recht hübsch bei leicht durch Erwärmen getrübbten Spaltblättchen von Gips; sie sind mit höchst zierlichen regelmäßig gestalteten Verdunstungsfiguren übersät. Auch die im Zusammenhange mit den Ätzerscheinungen stehenden Lichtfiguren sind ein recht praktisches Mittel zur Feststellung der Kristallsymmetrie geworden. Man erblickt sie auf geätzten Flächen bei der Durchsicht nach einer Lichtquelle oder im Reflex. Bei geeigneter Versuchsanordnung geben sie die Symmetrie der betreffenden Kristallfläche in der Anordnung zierlicher heller Punkte und Streifen wieder.

XIII. Wechsel der Kristallgestalt. Es erscheint selbstverständlich, daß die Molekularanordnung der Kristalle gleicher mineralischen Art, z. B. die Struktur aller Kalkspate, aller Eisenkiese, aller Diamanten jeweils dieselbe ist. Die Gestalt hingegen, welche den innerlich stets gleichartigen Molekelhaufen dieser Minerale gegen die Außenwelt abgrenzt, wechselt in oft bunter Mannigfaltigkeit. Höchst lehrreich in der Hinsicht ist ein Blick auf Kalkspatausstellungen in größeren Schausammlungen. Die Verschiedenartigkeit der Erscheinungen ist in der Tat erstaunlich.

Dieser Wechsel der Oberflächenentwicklung muß wesentlich auf Beziehungen beruhen, die zwischen dem konstanten inneren Bau und den Variablen der Umgebung bestehen. In der Tat hat man einen Hauptfaktor für die verschiedene Ornamentik der Fassade von Kristallgebäuden in den Lösungsgenossen gefunden; das sind die chemischen Stoffe, die außer der sich ausscheidenden Substanz an einer Lösung teilnehmen. Schon S. 540 ist auf die große Verschiedenheit der Formentwicklung von Chlornatrium hingewiesen, das aus sonst von Beimengungen freiem Wasser in Würfeln kristallisiert, das aber nach F. Ritzel aus mit Harnstoff zu 12,5% versetzter Lösung sich in Kuboktaedern bildet und bei Verwendung 40% Harnstoff führenden Lauge in reiner Oktaederform ausfällt. Durch entsprechende Verfahren kann man Alaun nach Belieben in

Entwässerungsfiguren.

Lichtfiguren.



Mannigfaltigkeit der Ornamentik bei derselben Kristallart.

Fig. 19 a, b Ätzfiguren und Fig. 19 c Lichtfigur auf einer Rhomboederfläche von Kalkspat.

Lösungsgenossen als Ursache wechselnder Kristallentwicklung.

Würfeln oder in Oktaedern züchten. Und so liegt es denn nahe, den Grund der wechsellvollen Gestalt des natürlichen Kalkspats und anderer Minerale in der verschiedenen Zusammensetzung der Lösungen zu sehen, in denen sie entstanden.

Natürlich befriedigt der obige, rein tatsächliche Zusammenhang noch nicht. Zur Vertiefung der Erkenntnis dieser in der Mineralwelt so bedeutsamen Erscheinung ist es angebracht, sich den Vorgang des Kristallwachstums nach P. v. Groth, A. Johnsen, H. Gerhart u. a. näher vorzuführen.

Theoretische  
Vorstellungen  
und  
experimentelle  
Erfahrungen.

Denkt man sich als erste feste Bildung einer verdunstenden Lösung einen winzigen Kristall, etwa von Oktaederform, so vollzieht sich seine Vergrößerung erfahrungsgemäß durch schaliges Absetzen weiterer Kristallsubstanz um den Kern. Einen Anhalt für die Wachstumsgeschwindigkeit der Flächen gibt die Ausmessung ihres Abrückens vom Kristallmittelpunkt, dem Ursprung A. Johnsens. Da alle Flächen eines Oktaeders gleichartig sind, müssen sie es auch bezüglich der Wachstumsgeschwindigkeit sein; man wird also erwarten, daß die Ebenen des sich vergrößernden Oktaeders stets gleiche Ursprungsdistanz haben. Die Erfahrung zeigt, daß dies im allgemeinen nicht der Fall ist. Daher müssen andere Umstände mitspielen. Das sind nun wohl die Zufälligkeiten der Konzentrationsströmungen in der Lösung und die Lage des Kristalls zu ihnen.

Sind mehrere Gestalten an einem wachsenden Kristall vertreten, so wird es außer von solchen beiläufigen Umständen von dem Verhältnis ihrer Wachstumsgeschwindigkeiten abhängen, welche Form die Vorherrschaft gewinnt. Es ist das natürlich die mit kleinster Auflagerungsgeschwindigkeit; denn sie bleibt dem Mittelpunkt des Kristalls am nächsten, schneidet also letzteren mit größter Fläche nach außen ab. Die langsamst vorrückenden Ebenen werden allmählich andere überwuchern können, z. B. mag ein Oktaeder den Würfel zurückdrängen und schließlich verschwinden lassen. Eine Kugel wird beim Wachstum sich anfangs mit verschiedenartigen ebenen Flächen bedecken, bis am Ende vielleicht eine Gestalt allein herrscht. Derartige Kristallisationen sind z. B. von A. Rauber (1895) am Alaun angestellt.

Eine Erklärung dieser Umstände versuchte P. Curie (1885). Nach ihm wird vom wachsenden Kristall ein Minimum der Oberflächenenergie in Berührung mit seiner Mutterlauge erstrebt, wofür die Kapillaritätskonstante ein Maß ist. Beim Steinsalz der Kombination Würfeloktaeder würde also das Produkt  $a \cdot w + b \cdot o$  ein Minimum sein, wo  $a$  die Kapillaritätskonstante des Würfels mit der Oberfläche  $w$  ist und  $b$  und  $o$  entsprechend für das Oktaeder gelten.

Eine Formel für die Umstände des Wachstums und entsprechend der Auflösung hat auch W. Nernst aufgestellt. Es liegt ihr die Auffassung zugrunde, daß sich mit größter Geschwindigkeit (unendlich viel schneller, als ein Ausgleich durch Diffusion zustande kommen kann) an der Oberfläche der festen Substanz eine gesättigte Lösungsschicht bildet, von der aus fortgesetzt Substanz in die untersättigte Lösung abströmt. Maßgebend für eine Verschiedenheit der Auflösungsgeschwindigkeit ungleichartiger Kristallflächen wären danach



die Dicke  $\delta$  der an der Grenze der Kristalle sich momentan bildenden gesättigten Lösungsschicht, und fernerhin die Löslichkeit der betreffenden Substanz. Nach Untersuchungen von Nernstschen Schülern und von F. Ritzel tritt bald die eine, bald die andere Größe in den Vordergrund.  $\delta$  scheint sehr stark wechseln zu können; für die Löslichkeit wird man von vornherein keine großen Unterschiede der Flächen erwarten. Immerhin gelang es F. Ritzel am Steinsalz solche Differenzen aufzufinden. Nach ihm ist der Würfel dieses Salzes in einer Chlornatriumlösung weniger löslich als das Oktaeder; in harnstoffhaltiger Lauge ist es umgekehrt. Wie nun von zwei Modifikationen eines Stoffes die weniger lösliche die beständigere ist, so gilt das für die Würfel- bzw. Oktaederentwicklung entstehender oder wachsender Kristalle. In reiner NaCl-Lösung ist der weniger lösliche Würfel, in harnstoffhaltiger das dann weniger lösliche Oktaeder stabil. Der einfache direkte Beweis, daß z. B. eine durch Steinsalzwürfel gesättigte Lösung Oktaederflächen angreift, steht allerdings noch aus.

Ersichtlich liegen die Verhältnisse der Flächenbildung unter dem doppelten Einfluß des Curieschen Prinzips und dem der Löslichkeitsunterschiede verschiedener Flächen verwickelt. Weitere Studien sind zur Klärung erforderlich.

Hand in Hand mit den theoretischen Erwägungen müssen natürlich statistische Untersuchungen über das Auftreten der Flächen und ihres Vorkommens gehen. Daß es in der Kristallwelt in der Hinsicht eine gewisse regierende Gesetzmäßigkeit gibt, wurde schon 1874 von G. Junghann erkannt, später haben vor allem V. Goldschmidt, ferner H. Baumhauer, E. v. Fedorow und E. Sommerfeldt recht beachtenswerte einschlägige Regelmäßigkeiten in der Ornamentik von Kristallen aufgefunden. Geht man von passend gewählten Grundformen (100); (010); (001) aus, so lassen sich durch Addition der gleichstelligen Indizes zweier Flächen bekanntermaßen weitere tautozonale Gestalten ableiten, wie das folgende Schema zeigt: (100) (110) (010); (010) (011) (001); (100) (101) (001). Durch zweite, dritte, vierte und noch weitere Wiederholung des Verfahrens kommt man zu neuen theoretischen Reihen z. B. zu (100) (210) (110) (120) (010), und die Erfahrung bekundet, daß die Verknüpfung von tautozonalen Flächen durch solche Differenzierung in der Tat bei der Ausgestaltung der Kristalle eine Rolle spielt. Natürlich werden die Indizes der höheren Ableitungen immer größer und damit die Flächen im allgemeinen weniger wahrscheinlich.

Vielfach ist der Bau der Zonenreihe unsymmetrisch. Man hat dann gewissermaßen eine schwache Ausgangsfläche und eine stärkere Zielfläche, bei deren Annäherung sich die Formen in der Zone häufen.

Den grundlegenden Einblick in diese bedeutsamen Verhältnisse hat V. Goldschmidt durch die Aufstellung seines Gesetzes der Komplikation geschaffen; es läßt sich in kurze folgendermaßen kennzeichnen. Denkt man sich die Kristallflächen als Zeugen von Kräften, die von den Kristallpartikeln ausgehen und jeweils senkrecht zu den Flächen gerichtet sind, so mögen in Fig. 21 MA und MB die Richtungen dieser Kräfte bezüglich der Haupt- (oder

Statistik des Auftretens von Kristallformen.

Komplikations-Gesetze.

Primär-) flächen A und B der Fig. 20 vorstellen. Aus diesen Primärkräften MA und MB leiten sich andere Kräfte und damit zu diesen senkrecht stehende Kristallflächen leicht ab, so aus Ma (der Hälfte von MA) und aus Mb (der Hälfte von MB) die Resultante Mc, zu der senkrecht die Fläche C steht. Weiter

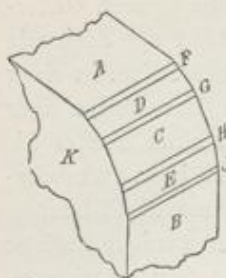


Fig. 20. Flächenserie in einer Zone.  
(Nach V. Goldschmidt.)

können  $\frac{1}{2}$  Ma und  $\frac{1}{2}$  Mb zu Md zusammentreten, sowie  $\frac{1}{2}$  Mc und  $\frac{1}{2}$  Mb zu Me, entsprechend den Flächen D und E in Fig. 20. Ebenso leiten sich die Formen F, G, H, J in derselben Figur ab. Ersichtlich wird die Rangordnung dieser Flächenserien immer geringer; des weitern ist selbstverständlich, daß die Ornamentik des Kristalls der Fig. 20 genau so wie es oben bezüglich der Zone AB vollzogen ist auch hinsichtlich der Zonenfolge an den Kanten zwischen K und B sowie zwischen K und A geschehen kann.

Solche Verhältnisse lassen sich nach V. Goldschmidt sehr anschaulich in gnomonischer Projektion übersehen. Man fängt dabei alle vom Kristallmittelpunkt M auf die Flächen gefällten Lote auf einer Ebene auf, in der die Zone AB durch die Linie AZ (parallel MB) in Fig. 21 gekennzeichnet sei. MA sticht auf AZ in o ein, MB in  $\infty$ , Mc in C mit dem  $\frac{1}{2}$  Abstände  $AC = MB = 1$ . Dann ist  $AD = \frac{1}{2}$ ,  $AE = 2$ .

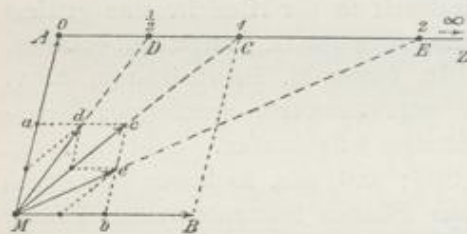


Fig. 21. Flächenserie einer Zone in gnomonischer Projektion. (Nach V. Goldschmidt.)

So stellt sich heraus, daß die Lage der in Rede stehenden tautozonalen Flächen A, D, C, E, B durch die Zahlen  $0, \frac{1}{2}, 1, 2, \infty$  dargestellt wird; sie bilden eine harmonische oder (wenn vollständig) Normalreihe Goldschmidts. Nach ihm spielen in der Kristallwelt folgende Reihen eine ausschlaggebende Rolle.  $N_0 = 0, \infty$  (das sind A und B für sich in Fig. 20);  $N_1 = 0, 1, \infty$  (A, C, B in Fig. 20);  $N_2 = 0, \frac{1}{2}, 1, 2, \infty$  (A, D, C, E, B in Fig. 20) und  $N_3 = 0, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2}, 2, 3, \infty$  (alle tautozonalen Flächen in Fig. 20). Weiter geht die Differenzierung in der Regel nicht. Zwar kommen bei sehr flächenreichen Kristallen, wie Kalkspat, in einer Zone gelegentlich zusammen oder an verschiedenen Kristallen weit mehr Formen vor, als diesen harmonischen Reihen entspricht, die Betrachtung des Projektionsbildes zeigt in solchen Fällen indes, daß die zwischen den Endpunkten der Zone gespannten Linien in Strecken mit zahlreichen Projektionspunkten und leere Teilstrecken zerfallen. Betrachtet man jede Strecke für sich, indem man ihren Anfang und ihr Ende zu 0 bzw.  $\infty$  in obiger Darlegung macht, so findet man nach V. Goldschmidt das Komplikationsgesetz wieder bestätigt. Die kristallographische Formel für diese Transformation ist sehr einfach, nämlich  $p = \frac{z-z_1}{z_2-z}$ , in der  $z_1$  und  $z_2$  das alte Anfangs- bzw. Endglied und  $z$  das umzuformende Glied bedeutet. Flächen

z. B. mit  $z = 1, 4/3, 3/2, 5/3, 2$  geben in der Verwandlung nach obiger Formel  $0, 1/2, 1, 2, \infty$ , erweisen sich also nach dem Gesetz der Komplikation angeordnet.

Diese harmonische Verknüpfung der Glieder kristallographischer Flächenreihen durch Komplikation ist im übrigen, wie V. Goldschmidt in vergleichenden Studien fand, der Ausdruck einer Gesetzmäßigkeit, die sich in umfassendem Maße auch sonst geltend macht, so im Reiche der Musik, der Farben und in der Anordnung der planetaren Sternwelt.

XIV. Verzerrung und Verkümmern von Kristallformen. Bei den bisherigen Betrachtungen galt es im allgemeinen dem Ideal der Entwicklung: Ebenen umgrenzen den kristallographischen Bau derart, daß alle gleichberechtigten Flächen gleich weit vom Mittelpunkte des Körpers abliegen und somit gleich groß sind. Der Fall wird für gewöhnlich in den Modellen, die K. v. Linné (1707—1778) in unsere Wissenschaft einführt, wiedergegeben. In Wirklichkeit entspricht die Begrenzung der Kristallmasse nur in seltenen Fällen diesem Ideal. Die Zentraldistanz gleichberechtigter Flächen ist meist verschieden, die Kristallform mithin verzerrt. So gibt es Goldkristalle, die durchaus nicht das Rundliche zeigen, das den idealen isometrischen Formen eigen ist, die vielmehr sehr dünne Blättchen nach einer Oktaederfläche sind, Rotkupfererzwürfel, die wie lange, zarte, tetragonale Säulen mit Basis erscheinen, und Bergkristalle von orthotrimetrischem, monoklinem oder triklinem Habitus. Schon Agricola (1490—1555) waren solche Mißbildungen des Quarzes aufgefallen; er erkannte, daß am Bergkristall oft eine breite Säulenseite einer schmalen gegenüberliegt. Indes bei diesem wie bei allen anderen Mineralien bewahrheitet sich Stenos Fundamentalsatz von der Unveränderlichkeit der Neigungswinkel zwischen den Kristallflächen. Sein „non mutatis angulis“ darf man allerdings nicht astronomisch genau nehmen. Die ins Feinste ausgebildete Winkelmeßkunst findet fast stets in kleine Bruchteile von Graden gehende Abweichungen; dazu kommen allerlei Störungen des Oberflächenbaus, wie Krümmungen, Knickungen (sog. Vizinalflächen), Streifungen, regelmäßige Erhabenheiten (Subindividuen), Vertiefungen u. a. m.

Recht eigenartig unter den Kristallen sind auch die unvollkommenen Raumerfüllungen der Skelette, wie sie jedermann von den zierlichen Schneekristallen kennt, die mit ihren sechsstrahligen Fiederchen gewissermaßen zunächst einen Achsenstern angelegt haben und nicht zur geschlossenen Basistafelung weiter vorangeschritten sind. Nach O. Lehmann handelt es sich dabei wesentlich um das bevorzugte Wachstum scharfer Elemente, der Ecken und Kanten, also von kristallographischen Bauteilen, die ja in der Tat einen gewissen Vorrang hinsichtlich des „Kristallisationshofes“ genießen, aus dem jedes Flächenteilchen sein Wachstumsmaterial durch Diffusion bezieht. Vgl. Fig. 22, welche zeigt, daß d und e nicht nur aus b und c, sondern auch aus A Nahrung erhalten.

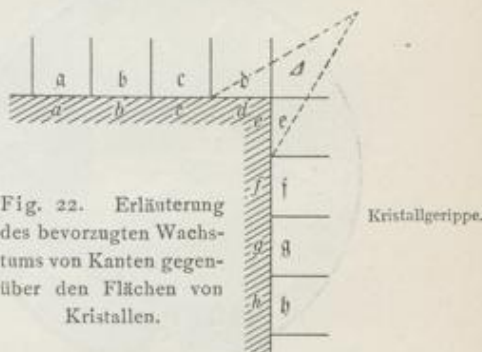


Fig. 22. Erläuterung des bevorzugten Wachstums von Kanten gegenüber den Flächen von Kristallen.

Kristallgerippe.

Sehr leicht lassen sich bei vielen künstlichen Stoffen Skelette zuwege bringen. Ganz prächtig ist z. B. die zierliche Art der reich verstrickten Wachstumsformen des Chlorammons.

Ver-  
kümmerungen.

Eine Fülle solcher Erscheinungen deckt das Studium der petrographischen Kleinwelt auf; zumal bei den aus dem Schmelzfluß erstarrten Gesteinen mit im wesentlichen glasiger Entwicklung sind mikroskopische Kristallskelette häufig. Die hyaline Art ihrer Umgebung weist auf schnelle Erstarrung hin, und es ist wohl verständlich, daß es gerade unter solcher Ungunst der Umstände häufig zu nur unvollkommenen Bildungen der Ausscheidungen gekommen ist. So findet man denn vielfach in Obsidianen überhastete Kristallisationen, die als „Mikrolithe“ nicht nur in der Größe sehr stark zurückgeblieben, sondern auch, wie H. Vogelsang zeigte, als gekrümmte Härchen (Trichite), Kügelchen (Globulite), knochenförmige Stäbchen (Longulite), Perlschnüre (Margarite) in unvollkommenen Stadien der Kristallentwicklung steckengeblieben sind. Ihre mineralische Art ist meist nicht zu ermitteln.

Runde  
Kristalle.

Die Verrundung der mikrolithischen Gebilde erinnert an die Kugelform der flüssigen Kristalle. Es sind auch wohl bei beiden der Festigkeit überlegene große Oberflächenkräfte als gleiche Ursache wirksam; sie machen sich wie es hiernach scheint, auch bei festen Substanzen noch energisch geltend, wenn die Materie in sehr feiner Verteilung vorliegt, wie eben bei den so außerordentlich kleinen kristallinischen Bildungen. Die hohe Entstehungstemperatur wird dabei von Einfluß sein.

In anderen Fällen sind sphäroidische einheitliche Kristalle gewissermaßen Pseudomorphosen nach flüssigen Tropfen, so bei den vom Verfasser nicht selten beobachteten kugelrunden, klar durchsichtigen, kleinen Hagelkristallen; wohl auch bei gewissen Olivinchondren der Meteorite.



Fig. 23. Körniges Gefüge von Granit.

Häufigkeit  
kristalliner  
Materie ohne  
ebene Flächen.

Zu betonen ist, daß in der Natur die Hauptmasse des kristallinen Materials überhaupt keine kristallographische Flächenentwicklung hat; denn wenn auch die Kristallbildungen, wie sie sich in Hohlräumen der Gesteine vollziehen, wenigstens einseitig entwickelte Formen zeigen, und in anderen Fällen schwer gebildete Individuen, wie Borazit in Salz, Granat in Glimmerschiefer,

sogar rundum ausgebildet sind, so bekundet doch die Petrographie, daß die kristallinen Gemengteile der Gesteine zumeist in Körnerform gewachsen sind, so der Feldspat und Quarz des Granits, das Steinsalz, der Kalkspat im Marmor. Es beruht diese, der Neigung, sich mit ebenen kristallonomischen Flächen zu formen widerstrebende Entwicklung offenbar auf der gegenseitigen Hemmung der Individuen beim Wachstum. Weil die Gemengteile am Ende ihrer Kristallisation, also bei der Randbildung, gleichzeitig Substanz auf sich niederschlugen, hinderten sie sich wechselseitig an „idiomorpher“ Entwicklung; sie wurden „alotriomorph“. Am schlechtesten gestellt sind in der Hinsicht natürlich die zuletzt sich bildenden. So ist es eine verbreitete Erscheinung bei natürlichen und künstlichen Kristallisationen von Schmelzflüssen, daß die erstgeborenen Individuen als „Einsprenglinge“ kristallographisch wohl entwickelt sind, der Rest aber sich weniger vollkommen, etwa feinkörnig oder faserig als „Grundmasse“ ausgebildet hat. Man nennt dies Gefüge porphyrisch. Auch nimmt das Letzterstarke wohl die Zwickel zwischen Leisten oder Tafeln ein, wie der Augit im Rahmen der Feldspate bei Diabasen. Es liegt dann die ophitische Struktur der Petrographen vor. Bei gleichzeitiger Entstehung von Feldspat und Quarz in Schmelzflüssen gibt es oft eine Durchwachsung der Individuen, die Implikationsstruktur der Gesteinskundigen.

Eine solche gegenseitige Behinderung an kristallographischer Formentwicklung bei gleichzeitiger Bildung verschiedener Mineralien spielt eine ganz besonders große Rolle bei den sog. metamorphen Gesteinen. Das sind die kristallinen Schiefer, wie Gneis, Glimmerschiefer, und die Kontaktgesteine, erstere in tieferen Zonen der Erdkruste unter dem Einfluß erhöhter Temperatur, starken Druckes und überhitzten Wassers umkristallisierte Massen, letztere in der Nachbarschaft von großen natürlichen Schmelzflüssen unter der Einwirkung sie durchdringender heißer Lösungen verändert. Bei der Wandlung dieser Gesteine kam die Gunst der ersten Bildung, wie es scheint, keinem Gemengteil zu; alle Komponenten wuchsen gleichzeitig, sich kristallographisch mangelhaft entwickelnd, gegenseitig umfassend, auch wohl durchdringend. Die Folge ist eine eigenartige kristalloblastisch genannte Struktur. Es macht sich dann

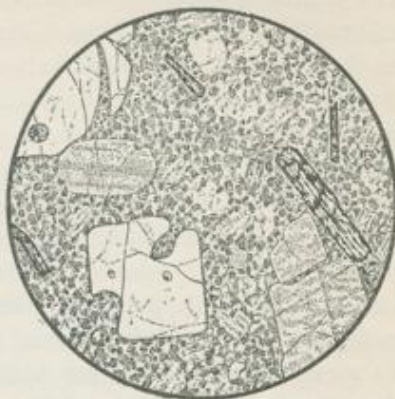


Fig. 24. Porphyrisches Gefüge bei Quarzporphyr. (Nach Reinisch.)

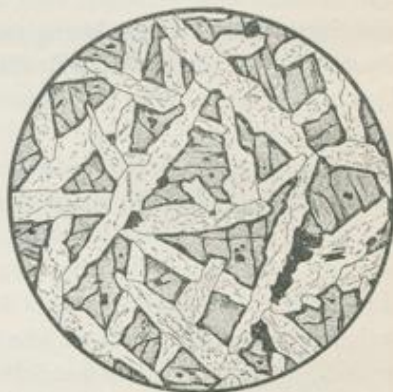


Fig. 25. Ophitisches Gefüge von Diabas.

eine Altersfolge der Bildungen nicht geltend, vielmehr hebt nur die mehr oder minder ausgeprägte Kristallisationsfähigkeit der verschiedenen Bestandteile den einen oder anderen gestaltlich heraus.

Form-  
zerstörungen.

Nicht selten hat man es im übrigen bei den unvollkommenen Kristallen mit nachträglichen Formänderungen zu tun, und zwar besonders häufig mit magmatischen Resorptionen. Die Kristallisationsbahn der Schmelzflüsse bringt es eben als ganz normalen Verlauf der Dinge mit sich, daß Ausscheidungen entstehen, die im weiteren Lauf der Verfestigung unbeständig und daher in die Schmelze wieder aufgenommen werden. Reste, zu deren Resorption die Zeit mangelte, zeugen von diesem charakteristischen Zug der Entstehungsgeschichte der Gesteine. Natürlich sind es meist frühe Ausscheidungen, z. B. Olivine in Basalten, Hornblenden in Andesiten, gern auch Quarzeinsprenglinge in Porphyren, die einen solchen Zerstörungsakt erfuhren (vergl. Fig. 24 S. 581). Die verrundete Gestalt der Diamanten in der Eruptivbreccie des afrikanischen blue ground deutet wohl auch darauf hin, daß sie im Begriff waren, sich im Magma zu verflüssigen; vor völliger Auflösung bewahrte sie die explosive Ejektion aus dem ihnen verderblichen tieferen Schmelzherde.

Weiter haben mechanische Kräfte gelegentlich umgestaltend auf die Form von Kristallen gewirkt, so das gegenseitige Drängen und Drücken der im Schmelzfluß schwimmenden Ausscheidungen, vor allem aber die Gewalt des Gebirgsdruckes, der z. B. die Feldspate von manchen längst erstarrten Gabbrogesteinen zu förmlichem Grus zerquetscht hat; oft lagern in dem Trümmerwerk noch einzelne größere Reste. Zuweilen sind Gemengteile, allseitig von ihren Nachbarn zusammengehalten, plastisch umgeformt, wie man es an krummen Spaltflächen von Steinsalz und Kalkspat wahrnimmt. Eine ganz besonders interessante Erscheinung ist es, wenn sich unter solchen Verhältnissen die Spannung durch sekundäre Zwillingsbildung in Form einer Lamellierung auslöst. Das hat sich oft beim Kalkspat des Marmors, sowie beim Carnallit der Salzgesteine vollzogen.

XV. Zwillingsbildung und Polysymmetrie. Zwillinge sind gesetzmäßige, nicht parallele Verwachsungen gleichartiger oder nur durch Enantiomorphie verschiedener Kristalle. Gewisse kristallonomisch mögliche Flächen oder Kanten des einen lagern zu denen des andern parallel, ein Umstand, der sich mathematisch durch die Art der Bewegung kennzeichnen läßt, durch welche der eine Kristall in die Stellung des mit ihm verbundenen gelangen würde. Im wesentlichen handelt es sich in der Hinsicht um eine  $180^\circ$ -Drehung entweder um die Normale auf einer gemeinsamen rationalen „Zwillingsfläche“  $Z$  oder um eine solche Hemitropie nach einer gemeinsamen rationalen Kante  $Z$ . Natürlich ist die Idee der Hemitropie nur eine Schilderungsform. Die Kristallteile waren von Anfang an in Zwillingsstellung. Das wesentliche Moment liegt in dem tatsächlichen Bestande.

Als Beispiel für diese kristallographisch höchst wichtigen gesetzmäßigen Verwachsungen möge die Fig. 26 dienen. Das Bild stellt einen Albitzwilling dar. Die gemeinsame Fläche ist  $b'$ . Das rechte Individuum erscheint gegen-

über dem linken hemitrop nach der irrationalen Senkrechten auf  $b'$ . Alle Kanten dieser Flächen sind in beiden Kristallen parallel.

Im Anschauen solcher eigenartigen Gruppierungen ist es von nicht geringem Interesse, das vorliegende Tatsachenmaterial in Zusammenhang zu bringen mit den allgemeinen Prinzipien der Vergesellschaftung von Kristallflächen. Es sei in der Hinsicht an die von G. v. Tschermak aufgestellten fünf Fälle kristallographischer Ornamentik erinnert (S. 569). Das einfachste Element ist die für sich selbständige Fläche, das Pedion. Durch Hinzugesellen der parallelen Gegenfläche wird eine höhere Einheit, das Pinakoid, erreicht, bei dem sich die Ausgangsfläche in der entgegengesetzten Richtung ihres Lotes noch einmal zeigt. Durch Hemitropie entsteht das Sphenoid, durch Spiegelung das Doma. Alle drei, Pinakoid, Sphenoid und Doma, sind gewissermaßen Verzwilligungen von Flächen nach verschiedenen Gesetzen. Das Prisma mit seinen vier Flächen stellt in dem Sinne eine wiederholte Zwillingsbildung dar.

Nach Tschermak liegt die Verkörperung dieses Grundgedankens kristallographischer Bauart auch in den Kristallzwillingen vor, denn diese Vereinigungen von Individuen zum gegebenen Komplex lassen sich als eine Wiederholung nach denselben drei Stufen auffassen, nach denen die Gruppierung des Pedions zum Pinakoid, Sphenoid und Doma erfolgt.

Ersichtlich liegt in solchen Zwillingsgruppierungen das Moment, Gebilde von höherer Symmetrie zuwege zu bringen, als sie dem Individuum innewohnt. So zeigt sich in Fig. 26 deutlich eine Symmetrieebene, während eine solche im Einzelkristalle fehlt. Oft wird, wie dies besonders E. Mallard (1833—1894) betonte, durch wiederholte Zwillingsbildung ein pseudosymmetrischer Aufbau erreicht. Zumal wenn sehr schmale Individuen polysynthetisch miteinander verwachsen, ist die geometrische Täuschung vollendet. Die kennzeichnenden einspringenden Winkel entziehen sich in dem Falle der Beobachtung. So ist es bei der wiederholten Verzwilligung (den Viellingen) nach dem Albitgesetz; sie läßt gewisse trikline Feldspate monoklin erscheinen. Häufig zu beobachten ist auch eine Mimesie des hexagonalen Systems durch Verzwilligung orthotrimetrischer Kristalle; so geschieht es beim Witherit der Fig. 27, der aus sechs zwillingsmäßig sich rhythmisch wiederholenden Individuen besteht. Zuweilen stehen die Winkelverhältnisse des einzelnen Kristalls denen des nachgeahmten Systems so nahe, daß auch die genaueste goniometrische Untersuchung den zusammengesetzten Bau nicht aufdeckt. In der Hinsicht ist der Borazit ein berühmtes Beispiel, dessen scheinbare, lange für echt isometrisch gehaltene Gestalt des Würfels sich aus 24 regelmäßig verwachsenen orthotrimetrischen Individuen zusammensetzt. Erst die genaue optische Untersuchung durch C. Klein und H. Baumhauer hat die wirklichen Verhältnisse des so sehr komplexen Baues aufgedeckt.

Zwillingsbildung und die fünf Prinzipien der Kristallornamentik.

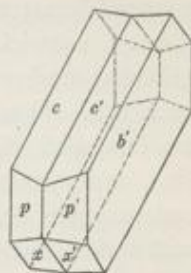


Fig. 26. Albitzwilling.

Tendenz der Zwillingsgruppierung.

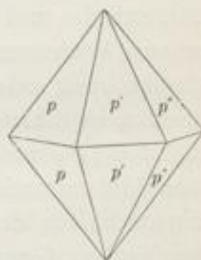


Fig. 27. Mimetische Zwillingsbildung von Witherit.

Die Mannigfaltigkeit der Zwillingsbildungen wird wesentlich erhöht durch die Verschiedenartigkeit der Verwachsungsfläche der vereinigten Kristalle. Vielfach fällt sie mit der Ebene Z zusammen, so beim Albit der Fig. 26. Andernfalls ist sie parallel einer anderen Fläche oder ganz unregelmäßig.

Auffallend ist es, daß Zwillingskristalle vielfach einen anderen Habitus haben als die einfachen Gebilde. Ebene Z bzw. Kante Z sind oft durch Größe ausgezeichnet; z. B. haben sich die Albitzwillinge tafelig nach der Zwillings-ebene b entwickelt, die Periklinzwillinge nach Z (die derselben Substanz angehören) sind nach der Kante Z gestreckt. Eine anerkannte Erklärung steht noch aus. Vom Standpunkte der Molekulartheorien läßt sich wahrscheinlich machen, daß die Zwillingsflächen Ebenen bevorzugter Lage im Raumgitter sind, indes ist eine durchgehende Beziehung zu den im Gitter gewiß gleichfalls bedeutsamen Spaltebenen und häufigsten Kristallflächen nicht aufzufinden, außer der, daß die Zwillingsflächen mit ihnen die Einfachheit der Indizes teilen.

Polysymmetrie.

Ein neues Band zwischen nieder- und hochsymmetrischen Kristallgruppen, die man sonst wohl als praktisch scharf begrenzte Abteilungen geometrischer Symmetrie aufgefaßt hat, ist durch Darlegungen von P. v. Groth über Polysymmetrie geknüpft. Es handelt sich dabei um die bereits erwähnten pseudosymmetrischen Körper, z. B. und besonders oft um orthotrimetrische Kristalle, die in ihrem Winkelmaß hexagonalen ähneln und ihnen durch die Drillingsbildung noch näher kommen können. Wenn sich die Zwillingslamellen in vielfacher Wiederholung immer feiner gestaltet haben, so kann schließlich auch die Kunst des Mikroskopierens und die Verschärfung des menschlichen Gesichtssinnes durch Anwendung des polarisierten Lichtes die zusammengesetzte Natur der Gebilde nicht mehr entschleiern. Der Körper stellt sich als durchaus hexagonal dar. Scheinbar liegen also dann zwei Modifikationen der Substanz vor, eine orthotrimetrische und eine hexagonale. Bei der Beurteilung dieser Verhältnisse ist es von höchstem Interesse, daß es zuweilen gelingt, durch mechanische Beanspruchung oder durch Temperaturerhöhung die niedersymmetrische Ausbildung in die höhersymmetrische überzuführen. Als Beispiel seien der Glaserit  $K_2Na(SO_4)_2$  und das entsprechende Kaliumnatriumchromat genannt, die monoklin mimetisch-hexagonal kristallisieren und beim Erwärmen die optischen Eigenschaften des Hexagonalen annehmen. Kennzeichnend ist dabei, daß die spezifischen Gewichte sich nicht ändern, und daß auch keine Wärmetönung auftritt, was der Fall sein würde, wenn es sich um die Verwandlung von Modifikationen polymorpher Körper handelte. Auch findet beim Nachlassen der Temperatur keine Rückbildung statt.

Diese und ähnliche Erfahrungen lassen Anwendungen auf wichtige Glieder des Mineralreichs zu. In der Tat wird man den monoklinen Kalifeldspat als einen feinst gebauten Zwillingsstock trikliner Lamellen auffassen dürfen. Dafür spricht die Gleichheit der Spaltbarkeit und Winkel sowie des spezifischen Gewichts, auch die Übereinstimmung gewisser optischer Eigenschaften.



## 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 zusammengedrückt, 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 hochgedrückt, 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  $45^\circ$  mit den gleichfalls rechtwinkligen Spaltlinien 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 herausgedrückt 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  $45^\circ$  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

Zwillingsgleitung.

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

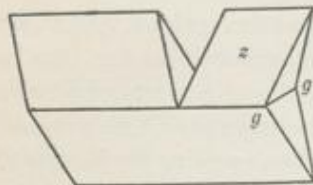


Fig. 28. Zwillingsschiebung bei Kalkspat.

(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 Richtungslinie 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 <sup>Härte.</sup> 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-Sklrometer 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 ( $\text{BaSO}_4, G = 4,5$ ).

Spez. Gew. der Mineralien.

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.

Spez. Gew. der Gesteine.

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

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 Mikroskoptisch 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  $\gamma$  (Fig. 29a) oder den kleinsten  $\alpha$  (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  $\gamma$ , den mittleren  $\beta$  und den kleinsten  $\alpha$ . (Fig. 29 c, d.) Zwischen  $\alpha$  und  $\gamma$

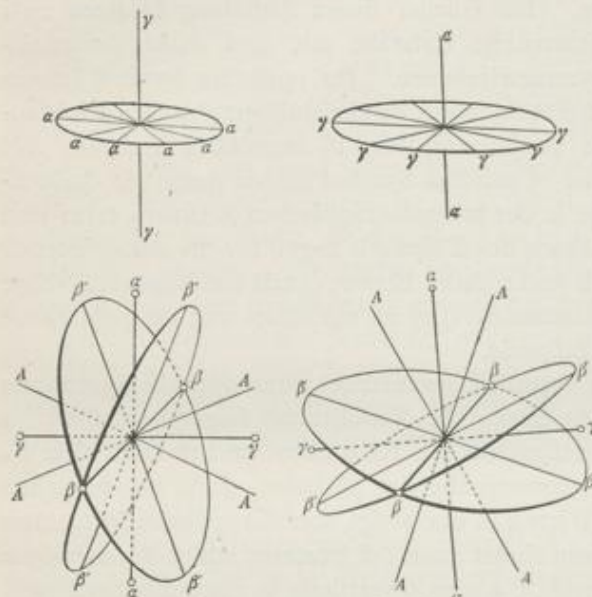


Fig. 29 a, b, c, d. Erläuterung des optischen Wesens doppelbrechender Kristalle.

gelegenen muß es natürlich in der Ebene  $\alpha\gamma$  vier Richtungen  $\beta'$  geben, denen parallel schwingend Lichtstrahlen gleichfalls den Brechungsexponenten  $\beta$  besitzen. So kann man denn durch diese Richtungen  $\beta'$  und die Achse  $\beta$  einen Kreis legen, dessen Radien die Größe  $\beta$  haben. Strahlen mithin, die senkrecht zu diesen beiden Kreisebenen sich fortpflanzen, werden nicht in zwei verschiedenen geschwinde Bewegungen zerfallen, wie es sonst im Kristall statthat. Diese beiden ausgezeichneten Normalen auf die Kreisschnitte in der Ebene von  $\alpha$  und  $\gamma$  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,  $\gamma$ , bei letzteren (Fig. 29d)  $\alpha$ . Die Teilung des stumpfen Winkels der optischen Achsen führt zur zweiten Mittellinie. Senkrecht zur Ebene  $\alpha\gamma$  der optischen Achsen verläuft die optische Normale  $\beta$ .

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  $\gamma a$  — 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

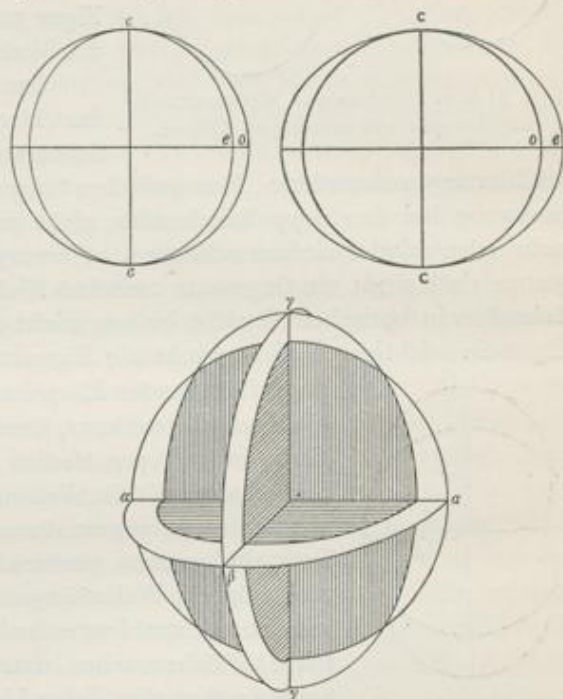


Fig. 30a, b, c, Strahlengeschwindigkeitsflächen doppelbrechender Kristalle.

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)

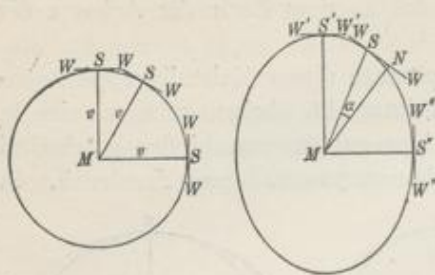


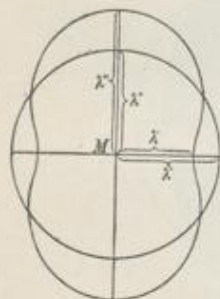
Fig. 31 a, b. Strahlen und Wellennormalen bei isotropen und anisotropen Körpern.

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  $\alpha$  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  $\lambda$  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  $\lambda$ -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.



$\lambda$ -Flächen.

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

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-

Unterscheidung isotroper und anisotroper Körper.

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 konoskopische  
Untersuchung.

Verhalten isotroper  
Körper  
zwischen gekreuzten  
Nicols.

Verhalten anisotroper  
Körper  
zwischen gekreuzten  
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,

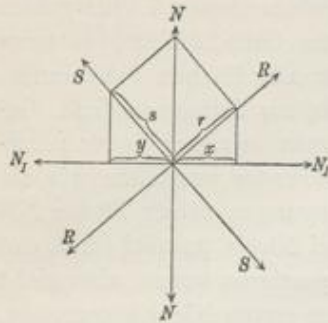


Fig. 33. Erläuterung der Interferenz in einer doppelbrechenden Platte zwischen gekreuzten Nicols.

dessen Schwingungsebene parallel  $N_1N_1$  geht. Auch hier kommt es zur Zerlegung: r und s geben auf  $N_1N_1$  Komponenten x und y ab, die als Schwingungen in derselben Ebene miteinander interferieren. Für gewöhnlich studiert man diese Interferenz im Tageslichte. Wenn also auch für eine Lichtsorte gerade Vernichtung statt hat, so ist das doch nicht für die übrigen der Fall; sie setzen sich zu einer Polarisationsfarbe zusammen. Diese von F. Arago (1811) entdeckte und von A. Fresnel zuerst richtig erklärte Polarisationserscheinung ist ein für anisotrope Körper höchst charakteristisches Merkmal.

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

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  $\Delta$  die erwähnte Wegdifferenz,  $n_2 - n_1$  die Stärke der Doppelbrechung, durch die Differenz der Brechungsexponenten ausgedrückt, und d die Plattendicke bedeutet.

Keilwirkung.

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  $\Delta$ , 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  $\Delta$ , 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  $90^\circ$  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  $\Delta$ . 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  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  abweichenden Winkel, so spricht man von einer Schiefe der Auslöschung zur Kante, deren Winkel  $\alpha$  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  $\alpha$  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 Auslöschungskreuz.

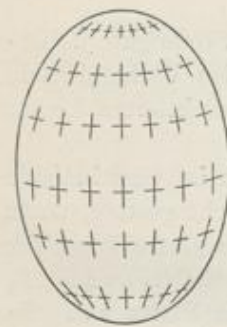


Fig. 34. Lage der Auslöschungsrichtungen auf dem Symbol eines optisch einachsigen Kristalls.

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 Auslöschungskreuzes 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 =  $5^\circ$ , beim Augit die von *kk* zur Achse *c* =  $42^\circ$  befunden.

Universalmethode.

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  $N'N'$ ;  $\alpha$  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.  $\alpha$  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  $360^\circ$  drehen. Dazu kommt als wesentliches Moment, daß  $\alpha$  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.

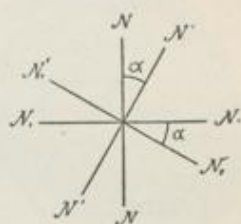


Fig. 35. Drehung der Schwingungsebene monochromatischen linear polarisierten Lichtes beim Durchgang durch eine zirkularpolarisierende Platte.

Zirkularpolarisation.

Schwingt in Fig. 35 das ankommende (einfarbige) Licht parallel  $NN$ , so verläßt es das Mineral mit Schwingungen parallel  $N'N'$ ;  $\alpha$  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-

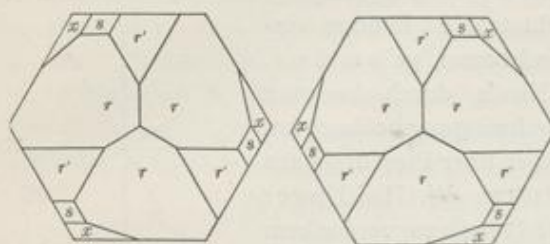


Fig. 37. Enantiomorphie des Quarzes.  
Fig. 37a Linksquarz. Fig. 37b Rechtsquarz.

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  $120^\circ$  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

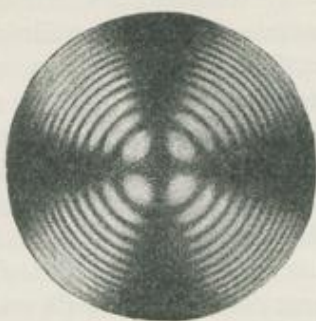


Fig. 38. Konoskopisches Interferenzbild einer optisch einachsigen Kristallplatte senkrecht zur optischen Achse. (Nach Hauswaldt.)

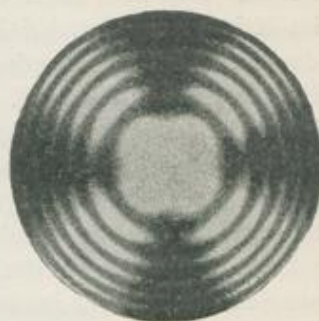


Fig. 39. Konoskopisches Interferenzbild einer zirkularpolarisierenden Quarzplatte. (Nach Hauswaldt.)

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.

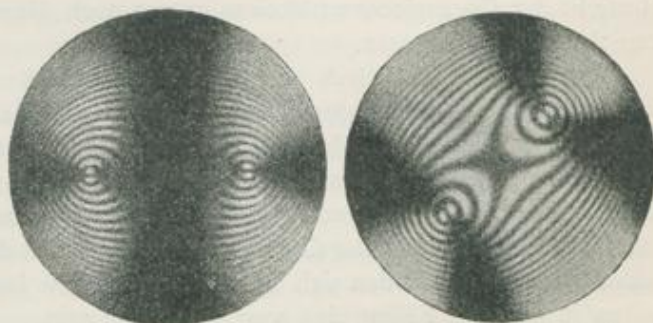


Fig. 40 a, b. Konoskopische Interferenzbilder optisch zweiachsiger Kristallplatten senkrecht zur ersten Mittellinie. (Nach Hauswaldt.)

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 Brechungsindex 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 Mittelpunkt 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 verzwilligte 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  $10^{\circ}$  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  $110^{\circ}$  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  $-42^{\circ}$ ) 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 elek-  
trischer 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 vielmal 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.

Die Chemie ist eine breite unentbehrliche Grundlage der mineralogischen Wissenschaft geworden. Das Nebeneinandervorkommen und das Vergehen der Kristalle kann nur unter chemischem Gesichtspunkte begriffen werden, und die Kenntnis der Wechselbeziehungen zwischen den physikalischen und chemischen Eigenschaften kristalliner Materie ist immer mannigfaltiger und für die Auffassung des Wesens der Kristalle bedeutsamer geworden. Umgekehrt ist aber auch die Mineralogie mit ihren Erfahrungen an den anorganischen Stoffen, welche die Erde aufbauen, und die das Material für anorganisch-chemische Studien liefern, sowie durch ihre ausgezeichneten Untersuchungsverfahren ein Moment der Förderung für die Entwicklung der Chemie gewesen, und sie wird es noch weit mehr werden, je weiter sich mineralogische Kenntnisse und Methoden in den Kreisen der Chemiker ausbreiten. Daß in der Hinsicht noch manches zu wünschen übrig ist, läßt sich nicht verkennen. Chemische Laboratorien mit einem leidlichen kristallographischen Instrumentarium, zum mindesten mit Goniometer und einem modernen Ansprüchen genügenden Polarisationsmikroskop sind wohl immer noch nicht häufig. Der Verfasser hat dies zur Untersuchung von Kristallisationen unentbehrliche Rüstzeug mehr in den chemischen Arbeitsstätten der Technischen Hochschulen als in denen der Universitäten gefunden. Zumeist hält die Besorgnis Verluste an kostbarer Arbeitszeit zu erfahren, auch wohl eine Scheu vor den Schwierigkeiten kristallographischer Studien die Chemiker von der Anwendung des mineralogischen Handwerkszeuges ab. In Wirklichkeit können ihnen die eleganten, schnell auszuführenden kristallographischen Verfahren häufig eine wertvolle Hilfe sein und den Fortschritt chemischer Arbeiten begünstigen. Es ist ja gar nicht zu verkennen, daß Gestaltsverhältnisse und physikalische, insbesondere optische Eigenschaften vielfach mit gutem Erfolg zur Charakterisierung und Wiedererkennung der in chemischen Laboratorien dargestellten Substanzen verwertet werden können. Läßt sich doch durch solche Beobachtungen in Kürze geradezu eine Fülle von Merkmalen auf einen Stoff häufen, als da sind: die Art des Systems, der Kristallgestalt, der Brechung und etwaigen Doppelbrechung, Schiefe der Auslöschung, Lage der Ebene der optischen Achsen, ihrer Dispersion, ihres Charakters der Doppelbrechung, des Pleochroismus u. a. m. Insbesondere haben es die Umhüllungsapparate (S. 594) leicht gemacht, kennzeichnende kristallographische Verhältnisse zu verwerten, da sie die Mühe des Präparierens durch Schneiden oder Schleifen ersparen.

II. Mikrochemische Analyse. Die erste Frucht solcher Erkenntnis von der Ausnutzbarkeit kristallographischer Verhältnisse für chemische Studien ist die mikrochemische Analyse, die sowohl von Mineralogen, wie K. Haushofer, A. Streng, E. Bořický, C. Klément und A. Renard, C. W. C. Fuchs, R. Brauns u. a., als auch von Chemikern wie H. Behrens gepflegt ist. Es handelt sich dabei um chemische Arbeiten im kleinsten Maßstabe, der aber durch mikroskopische Betrachtung multipliziert wird, und unter Anwendung der erwähnten kristallographischen Methoden. Die Ersparnis an gelegentlich wertvollem Material, an Zeit und Kosten liegt auf der Hand. Gelingt es doch

sogar an den zarten Häutchen der Gesteinsdünnschliffe sichere chemische Operationen auszuführen oder an so kleinen Proben, daß sie im üblichen Reagenzrohr als Stäubchen dem nur megaskopierenden Auge verschwinden würden. Die gewünschte chemische Umsetzung hat sich an solch kleinen Teilchen natürlich im Augenblick vollzogen, meist ohne an Schärfe zu verlieren. Vielfach genügt es sogar, nur die Oberfläche der Proben chemisch anzugreifen, so wenn der Nachweis von Kieselsäure oder des Chlorgehaltes in gewissen Silikaten geführt werden soll. Das Kieselschleimhäutchen, das man z. B. beim Ätzen von Nephelin mit Salzsäure erhält, läßt sich durch Fuchsinfärbung deutlich machen, das in winziger Menge in Lösung befindliche Chlor als Chlorsilber erkennen, Kohlensäureführung an mikroskopisch unter dem Einfluß von Salzsäure sich entwickelnden perlenden Bläschen, ein Chlorkaliumgehalt in gewissen natürlichen Salzen, wie Carnallit, an den Tausenden winziger Sylvinkriställchen, die von der Oberfläche des in Wasser sich zersetzenden Carnallitprobchens herabrieseln.

Das Bestreben bei mikrochemischen Studien geht natürlich einmal darauf hinaus, Reaktionsprodukte zu erhalten, die möglichst scharf durch Form und Optik gekennzeichnet sind, und andererseits dahin, den nachzuweisenden Stoff in eine chemische Verbindung zu ketten, an der er selbst nur geringfügigen prozentischen Anteil hat. So weist man wohl Tonerde in Form von isometrisch gut kristallisierendem wenig löslichen Cäsiumalaun ( $\text{Cs}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$ ) nach; nach Behrens gelingt es auf die Weise in einem Tropfen von 1 mg noch 0,00035 mg Aluminium zu erkennen. Natrium kann man als Doppelsalz von Uranyl-natriumacetat mit Uranyl-magnesiumacetat ( $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot \text{UO}_2 \cdot \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4 \cdot \text{MgC}_4\text{H}_6\text{O}_4 \cdot 2 \text{UO}_2 \cdot \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$ ) feststellen, das nur 1,48% des nachzuweisenden Metalles enthält.

Erfahrung und  
Theorie.

III. Chemische Formeln. Daß an dieser Stelle auf die Operationen der üblichen quantitativ-chemischen Mineralanalyse nicht einzugehen ist, erscheint selbstverständlich. Wohl aber sei in Kürze die Frage nach der chemischen Formel berührt. Soweit sie die Erfahrung über die Zusammensetzung der mineralischen Stoffe in der nüchternen Art darstellt, wie z. B. die Natur des Anorthits durch  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ , ist sie ein treues Bild der qualitativen und quantitativen stofflichen Art der betreffenden Substanz. Die sog. Strukturformeln von Mineralien hingegen sind in sehr vielen Fällen nur Kartenhäuser und Phantasiegebilde. Das gilt vor allem bezüglich der mineralischen Silikate, denen zumeist die Fähigkeit der chemischen Substitution abgeht, die bei den Stoffen der organischen Chemie in wundervoller Art zu einem Einblick in das stereochemische Wesen der Substanzen geführt hat. Für gewöhnlich zerstört ein chemischer Eingriff die Minerale sofort von Grund aus; die Umsetzungsprodukte haben keine sicher erkennbaren Beziehungen mehr zum Ausgangsmaterial. Ebensovienig ist ein systematischer Aufbau möglich. Eine Ausnahme von diesem entmutigenden Verhältnisse bietet sich nach G. v. Tschermak bei den Silikaten dar, die bei niedriger Temperatur mit schwachen Säuren unter Hinterlassung von Kieselgel zersetzbar sind. Dahin rechnen Zeolithe, Olivin, Leuzit,



Nephelin u. a. Nach dem genannten Forscher erhält man Anzeichen für die Natur der Kieselsäureart, die den chemischen Bau des Minerals gewissermaßen als Kernsubstanz einst bestimmte, durch planmäßiges Wägen des Verlustes an Wasser, der sich beim Stehen des Kieselgels an der Luft einstellt und in einem Gewicht-Zeit-Diagramm aufgetragen werden kann. Die erzielte Kurve zeigt einen Knick. Das durch ihn gekennzeichnete Verhältnis von Kieseldioxyd zu Wasser soll der betreffenden Mineralsäure entsprechen. In der Tat passen bei Innehaltung der von Tschermak angegebenen Versuchsbedingungen die Zahlen oft genug auf einfache Kieselhydrate wie Ortho- und Metakieselsäure, so daß die Annahme berechtigt erscheint, hier liegen bedeutungsvolle Fingerzeige nach der einzuschlagenden Richtung vor. Einwürfe sind von J. H. van Bemmelen und von O. Mügge erhoben, insbesondere der, daß bei wenig veränderten Temperaturen die Kurvenknick anders liegen als bei den Tschermakschen Experimenten; indes dürfte sich dieser Umstand wohl aus einer Zerstörung des Kieselhydrats in höherer Wärme erklären.

Feststellung der  
Kieselsäureart  
durch chemi-  
schen Abbau.

Ermutigend zum Verharren und Weiterforschen in der angegebenen Richtung ist der Hinblick auf den im ersten Abschnitt dargelegten kristallographisch-chemischen Abbau, der ja zeigt, daß in der Tat gewisse Kerne von Mineralien aus dem Akt der chemischen Zerstörung unversehrt hervorgehen. Verharren also z. B. noch die  $\text{SiO}_2$ -Teile des einstigen komplexen zeolithischen oder biotitischen Punktsystems in ihrer Lage, so erscheint es wohl möglich, daß Wasser, welches an Stelle der früheren Basen in den regelmäßig lückigen Bau eingereicht ist, bei niedriger Temperatur in molekularem Verhältnis zum Kieselreste steht, ob allerdings im nämlichen wie die ehemaligen Basen zur Säure, muß fraglich bleiben.

Im Hinblick auf solche Vorstellungen empfiehlt es sich vielleicht, den stereochemischen Hebel bei denjenigen Mineralien anzusetzen, welche, wie Zeolithe, Koenenit, Biotit, Chlorit, eines allmählichen Abbaues ohne Einsturz des Kristallgebäudes fähig sind. In der Tat haben entsprechende Untersuchungen bereits einige Anfänge strukturchemischer Kenntnis gezeitigt, so bei Zeolithen bezüglich der Rolle des Wassers. Das Verhältnis dieses Stoffes zum Silikat läßt sich als das einer kristallisierten kolloiden Lösung kennzeichnen. Ihr Wassergehalt ist jeweils das Ergebnis eines Gleichgewichtes zwischen Zeolith und dem ihn umgebenden Medium. Bereits 1887 wiesen P. Jannasch und F. Rinne das nach.

Zeolithisches  
Wasser.

Recht beachtenswert ist dabei, daß bei einem darauf untersuchten Zeolith, dem Desmin, die Zustände der Wasserführung, welche sich in der fortlaufenden Entwässerungsreihe durch einfaches molekulares Verhältnis von Silikat zu Wasser auszeichnen, auch physikalisch singular sind. Bei diesen Punkten fand Verfasser nämlich den sich entwässernden und optisch in außerordentlicher Wandlung begriffenen Desmin mit einem Achsenwinkel von  $0^\circ$  ausgestattet. Im übrigen ist es wahrscheinlich, daß ein solch eigenartiges Verhältnis fester Lösung, sei sie nun kolloidal nach Art der Adsorptionsverbindungen, wie sie wohl zwischen Wasser und Silikat in den Zeolithen vorliegt, oder molekular, auch bei anderen komplexen mineralischen Stoffen bestehen kann.

Sonstige zeolithische  
Beimischungen.

Darauf deuten die Erfahrungen der Thermoanalyse hin, welche eine Mischfähigkeit mancher chemisch sich fernstehender Stoffe nachweisen. Es wird darüber weiter unten bei Gelegenheit der Übersicht über die Lehre vom Isomorphismus zu sprechen sein. Manche jetzt auf dem Mineralogen noch lastende Schwierigkeit bei der Aufstellung chemischer Formeln wird durch Verfolg dieses Gedankens vielleicht verschwinden; so erklärt sich nach W. M. Bradley und W. E. Ford der Umstand, daß im Nephelin ein wechselnder Überschuß von  $\text{SiO}_2$  gefunden wird, durch die Annahme einer festen Lösung von  $\text{SiO}_2$  in  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ; möglicherweise liegt Entsprechendes vor bezüglich des Tonerdegehalts bei Augit und Hornblende, der Eisenoxydführung des Zinnsteins und in anderen Fällen mehr. Ob bei solchen Stoffen ein kristallographisch-chemischer Abbau möglich ist und wie er sich gegebenenfalls vollzieht, ist noch zu untersuchen. Bei der Verwertung der Ergebnisse wird man gut tun, die Pfade zu gehen, die A. Werner gebahnt hat. „Immer überzeugender sprechen die Tatsachen der anorganischen Chemie dafür, daß unsere aus den Konstitutionsverhältnissen der Kohlenstoffverbindungen entwickelten Valenzvorstellungen kein genügendes Bild vom Molekülbau der anorganischen Verbindungen abzuleiten gestatten. Das Erfordernis, die Valenzlehre zu erweitern, wird auch auf dem Gebiete der Mineralchemie dringend.“

Dabei ist gar nicht von der Hand zu weisen, daß viele Mineralien, so besonders die der Eruptivgesteine in einem ganz anderen Temperaturbereich entstanden sind, als der ist, in dem sie sich nunmehr befinden. Beim bekannten Wechsel der Valenz mit der Temperatur erscheint es möglich, daß die chemische Struktur von hochtemperiert entstandenen Mineralien bei ihrer Bildung eine andere war als bei niederer. Auch der Druck kann in der Hinsicht eine Rolle spielen. Da man Grund hat, anzunehmen, daß die Möglichkeit der Bildung fester Lösung bei höheren Wärmegraden steigt, so erscheint es nicht ausgeschlossen, daß gelegentlich Stoffe, die fest gelöst waren, bei Erniedrigung der Temperatur in atomistische Verkettung mit ihren Gefährten gezogen wurden oder aber sich als besondere chemische Verbindungen ausschieden und nunmehr einschlußartig erscheinen.

Das erstere kann um so eher vorkommen, als bei niederen Temperaturen Nebenvalenzen eine erhöhte Bedeutung erhalten und Verbindungen höherer Ordnung im Sinne von J. Berzelius und A. Werner entstehen können, sei es durch Anlagerung oder Einlagerung. Solche Verkettungen hat man unter den Mineralien in den Hydraten und Kristallwasser haltenden Salzen, die ja oft weit über den Rahmen der Hauptvalenzen hinausgehen, ferner in den als Doppelsalz bezeichneten Stoffen. Es handelt sich dabei um die Verknüpfung von Molekülverbänden.

Kristallisation  
aus Lösungen  
und Schmelz-  
flüssen.  
Allgemeine  
Grundsätze

IV. Die Bildung kristalliner Stoffe. In der Natur und im Laboratorium entstehen Kristalle durch Verfestigung von Flüssigkeiten, von Schmelzen und von Gasen, sowie durch Umstehen bereits festgewordener Stoffe.

Von vornherein ist dabei der Gedanke einer grundsätzlichen Verschiedenheit der Kristallisation aus Lösung und Schmelze, der die Mineralogen einst

in die feindlichen Lager der Neptunisten und Plutonisten teilte, abzuweisen. Eine Lösung wie das Meerwasser ist eine kalte Schmelze und ein Lavastrom eine heiße Lösung, ein in seinem Kristallwasser geschmolzenes Salz ein wasserdurchtränktes Magma, das durch Hinzufügen von weiterem Wasser in den verdünntesten Zustand einer Lösung gebracht werden kann. Neptunismus und Plutonismus sind miteinander versöhnt. Die Verschiedenheit der Temperatur bringt nur quantitative, nicht qualitative Unterschiede mit sich, wie insbesondere R. Bunsen (1861) in einem berühmt gewordenen Briefe an den Mineralogen A. Streng hervorhob. Außer diesem allgemeinen Moment verdient ein zweites betont zu werden, nämlich, daß in Lösungen (= Schmelzen) ein grundsätzlicher innerer Gegensatz zwischen Lösungsmittel und Gelöstem nicht vorhanden ist. Die Stoffe halten sich gegenseitig in Lösung.

Unter diesen allgemeinen Gesichtspunkten stehend ist es gelungen eine große Fülle von Kristallisationserscheinungen zu begreifen; es seien folgende herausgehoben.

In Fig. 41 ist auf der Vertikalen die maximalmögliche Lösung von 111 Molekülen NaCl in 1000 Molekülen Wasser bei 25° durch Punkt B gekennzeichnet, auf der Horizontalen die von 88 KCl in 1000 H<sub>2</sub>O durch A, während E mit den Koordinaten 89 NaCl und 39 KCl die Lösungsfähigkeit von 1000 H<sub>2</sub>O hinsichtlich gleichzeitig vorhandenen Chlornatriums und Chlorkaliums vorstellt. Die ungesättigte Lösung 1 führt beim Verdunsten von Wasser zur Sättigungslinie BE für NaCl, eine durch 3 gekennzeichnete zu AE, der Sättigungsgrenze für KCl. Im ersten Falle wird also zunächst NaCl, im zweiten KCl ausgesondert; in beiden Fällen geht die Kristallisationsbahn auf E zu. So bedeutet FE fortgesetztes Ausscheiden von NaCl, DE ein solches von KCl. Beim Erreichen von E, dem gemeinsamen Sättigungspunkte, fallen beide Salze in konstantem Verhältnis zusammen aus; die Lösung trocknet unter Beibehaltung einer bestimmten Zusammensetzung ein. Eine Lauge 2 führt unmittelbar auf E.

War im obigen Beispiel Wasserverdunstung Anlaß zur Kristallisation, so ist es in anderen Fällen ein Nachlaß der Temperatur. Die Ähnlichkeit der Vorgänge tritt durch das Diagramm der Fig. 42, das sich auf eine Lösung von NaCl in Wasser bezieht, heraus. Es kommt durch Ausscheidung eines

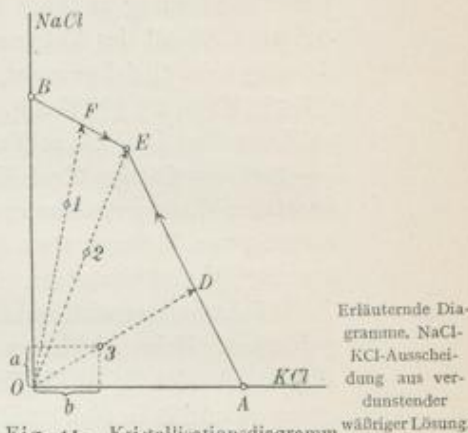


Fig. 41. Kristallisationsdiagramm von NaCl—KCl in wäßriger Lösung.

Erläuternde Diagramme. NaCl-KCl-Ausscheidung aus verdunstender wäßriger Lösung.

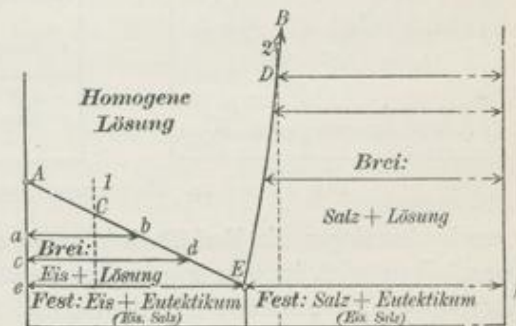


Fig. 42. Kristallisationsdiagramm von NaCl—H<sub>2</sub>O.

Kristallisation von NaCl bzw. H<sub>2</sub>O zufolge Temperaturerniedrigung.

Stoffes zur Bildung einer konstanten Lösung E, nach deren Erreichung die zwei Komponenten bei gleichbleibender Temperatur sich gleichzeitig und in stets demselben Verhältnis zueinander verfestigen. Auf der wagerechten Linie ist das Verhältnis von Salz zu Wasser vermerkt, ganz links 100% H<sub>2</sub>O, ganz rechts 100% NaCl, die Mitte würde 50% H<sub>2</sub>O : 50% NaCl bedeuten. Die Schmelzpunkte liegen auf den Vertikalen: in A (0°) für H<sub>2</sub>O, in der Verlängerung von EB für NaCl. Zum eutektischen Punkte E senken sich zwei Linien herab, links die Sättigungsgrenze für H<sub>2</sub>O, rechts die von NaCl. Die Erkaltung einer Lösung I deutet die punktierte Temperaturlinie an; sie trifft bei C die Grenze AE der Eisausscheidung; es fängt H<sub>2</sub>O an zu kristallisieren. Das setzt sich fort beim weiteren Abfall des Wärmegrades. Bei der Temperatur a steht Eis mit einer Lösung b im Gleichgewicht, bei c mit einer Lösung d, bei e mit einer solchen E (76,5% H<sub>2</sub>O, 23,5% NaCl). Andererseits führt eine Lösung 2 bei D zur Kochsalzkristallisation, bis schließlich ganz wie oben bei der Temperatur von f = e (— 22°) der flüssige Rest die Zusammensetzung E hat. Dann wird er bei fortgesetzter Wärmeentziehung unter Beibehaltung der Temperatur und Zusammensetzung von E durch stets gleichzeitige Ausscheidung von Eis und Salz in konstantem Verhältnis starr.

Allgemeinere Fassung.

Nicht anders wird es bei vielen binären Schmelzen von Salzen und Metallen gefunden. Beim Abkühlen sondert sich der Überschuss über E aus, sei es (in Fig. 43) A oder B; ist die Zusammensetzung E der Lösung erreicht, so kristallisieren A und B in gleichmäßigem Gemisch untereinander aus. Nicht wesentlich

Fig. 43.

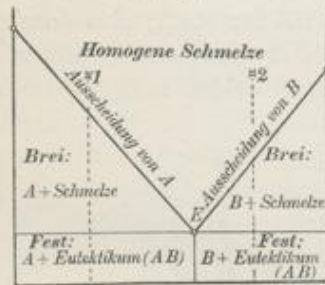


Fig. 44.

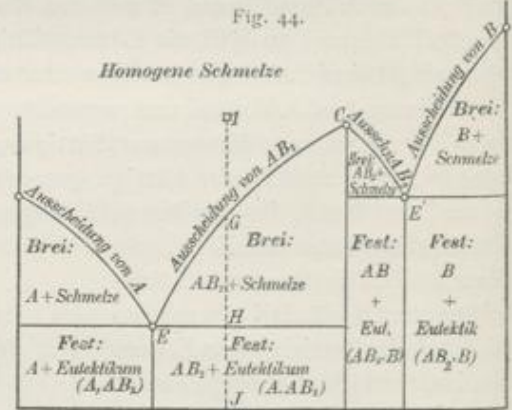


Fig. 43 und 44. Erstarrungsdiagramm von Schmelzen A—B.

verschieden liegen die Verhältnisse, wenn eine chemische Verbindung zwischen A und B möglich ist. In Fig. 44 kennzeichnet sie sich durch ein Maximum C der Grenzkurve zwischen Flüssigkeit und Brei. Zur Deutung des Diagramms betrachte man es als zusammengesetzt aus zweien, einem linken bis zur Vertikalen von C reichend und einem rechten sich anschließenden. Jedes für sich ist dem der Fig. 43 in den Grundzügen gleich.

Komplikationen.

Diese im allgemeinen Typus von H. W. Bakhuis Roozeboom aufgestellten Sinnbilder haben in ihrer prächtigen Klarheit immer mehr und mehr eine weite

Welt der Kristallisation erschlossen. Mit C. Doelter darf man allerdings nicht verkennen, daß gerade bei den mineralogisch und petrographisch vor allem in Betracht kommenden Silikaten mancherlei Nebenumstände verwischend und verschiebend in die Einfachheit der Schemata eingreifen, so das verschieden große Kristallisationsvermögen der Stoffe, ihre wechselnde Kristallisationsgeschwindigkeit, eine oft Platz greifende Unterkühlung, Dissoziation u. a. m. Von Bedeutung mag auch der Umstand sein, daß vielfach statt stabiler Kristallisationen sich metastabile vollziehen, analog z. B. der von A. Smits untersuchten Verfestigung des Systems  $H_2O - C_6H_5(OH)$ . Das metastabile Diagramm läßt die Verbindung eines Phenolhydrats  $(C_6H_5OH)_2H_2O$  vermissen, das bei stabilen Umständen zustande kommt. Schematisch zeigt Fig. 45 eine solche Unterschlagung der chemischen Verbindung C zwischen A und B.

Trotz all solcher Variationsmöglichkeiten ist aber mit J. H. L. Vogt nicht aus dem Auge zu lassen, daß hier ein Weg vorliegt, der in das Reich der Kristallisationsgesetze natürlicher Schmelzflüsse führt, und die mit Aufwand großer Mittel und unter Beobachtung aller Fehlerquellen von A. L. Day, E. T. Allen, E. S. Shepherd, F. E. Wright u. a. ausgeführten Untersuchungen am Carnegie-Institut in Washington und manche andere vorbildliche Versuchsreihen, wie z. B. die von R. Nacken über die Bildung des Apatits, erwiesen unwiderleglich die Wahrheit dieser Auffassung.

Von wichtigen Gesetzmäßigkeiten der Kristallisation von Schmelzen ließen sich schon aus den angeführten Diagrammen einige ableiten, so der bereits von R. Bunsen betonte Umstand, daß die Reihenfolge der Ausscheidungen nicht etwa durch die Aufeinanderfolge ihrer Schmelzpunkte gegeben ist. Sehr wohl kann der Quarz trotz hoher Schmelztemperatur seiner Kieselsubstanz nach dem weit niedriger schmelzenden Orthoklas entstehen, wenn eben die Sättigung für ihn später erreicht wird, als für diesen. Die erste Ausscheidung wird normalerweise bestimmt durch die jeweils vorliegende chemische Zusammensetzung und wechselt daher mit ihr. Bei Schmelzflüssen, die einem Eutektikum zustreben (Fig. 43), gibt das Verhältnis der Mischungszusammensetzung zu der des eutektischen Punktes die Entscheidung über die Art des vor anderen Kristallisierenden. Zu den Seiten des Eutektikums kehrt sich die Tendenz der Veränderung der chemischen Zusammensetzung im Schmelzflusse und damit das Recht der Erstkristallisation um. Schmelzen links von E in Fig. 43 scheiden zunächst A, solche rechts von E zunächst B aus. Die chemische Bahn der jeweiligen Schmelzreste geht im ersten Beispiel nach rechts, im zweiten nach

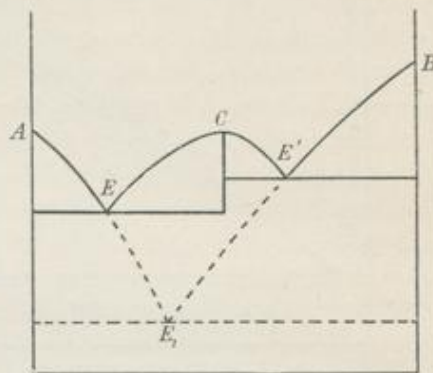


Fig. 45.  
Erstarrungsdiagramm zur Erläuterung des Ausbleibens einer zwischen A und B möglichen chemischen Verbindung.

Weitere  
Folgerungen.

links, in jedem Falle fort vom darstellenden Punkte des sich absondernden Stoffes.

Liegt der eutektische Punkt sehr nahe an der Vertikalen des einen reinen Stoffes, wie der für das System Blei-Silber (Fig. 46) nahe an der Bleilinie, so kann

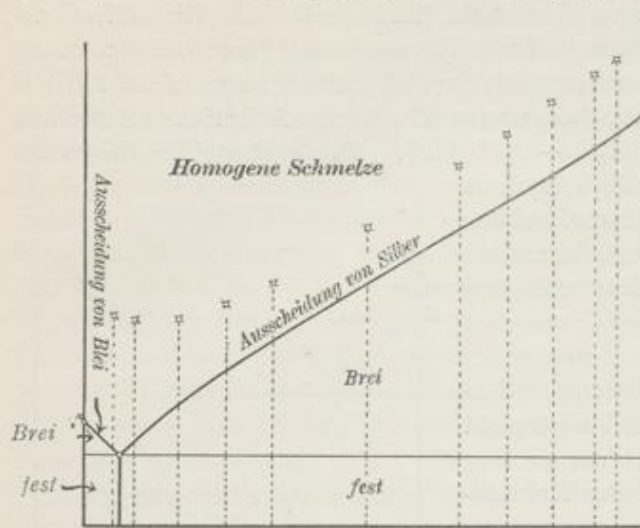


Fig. 46. Erstarrungsdiagramm von Pb—Ag-schmelzen.

es zu einer fast einheitlichen Ausscheidungsregel kommen. In dem ganzen Intervall von 100% Silber, 0% Blei bis 96% Blei, 4% Silber kommt es bei den erkaltenden Schmelzen zunächst zur Kristallisation von Silber; erst wenn ihr Bleigehalt 96% übersteigt, erscheint Blei als Erstling der Kristallisation. Es ist sehr wohl möglich, daß die H. Rosenbuschsche Regel der Erstarrung von natürlichen Schmelzflüssen, wonach die Folge

von basischen zu immer  $\text{SiO}_2$ -reicheren Mineralien bis schließlich zum Quarz charakteristisch ist, auf einem entsprechenden Umstande beruht.

Von petrographischer Wichtigkeit erscheint es übrigens in der Hinsicht, daß chemisch sich sehr nahestehende Schmelzen entgegengesetzte Kristallisationstendenzen haben können. So ist im Diagramm (Fig. 47) der Punkt C, der

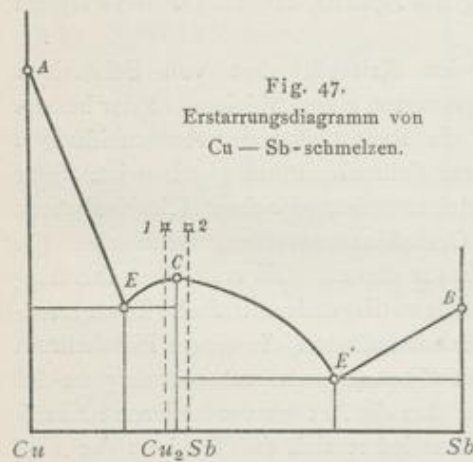


Fig. 47. Erstarrungsdiagramm von Cu—Sb-schmelzen.

den Schmelzpunkt der chemischen Verbindung  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  darstellt, wie eine Wasserscheide. Links von ihm geht die Bahn zum Punkte E, rechts nach  $E'$ . Eine Schmelze 1 bildet Einsprenglinge von  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  und eine Grundmasse aus  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  und Cu; bei der Legierung 2 kehren zwar die Einsprenglinge von  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  wieder, sie liegen aber in einer Grundmasse von  $\text{Cu}_2\text{Sb}$  und Sb. Andererseits würden Schmelzen rechts und links von E bzw.  $E'$  jeweils die Einsprenglinge wechseln lassen.

Schließlich sei auf einen mineralogisch und petrographisch ungemein wichtigen Umstand der Kristallisation hingewiesen, der sich unmittelbar aus den angeführten Diagrammen ersehen ließ, daß nämlich die Aufteilung der Schmelzen bzw. Lösungen durch Erkaltung nicht bei einem für jede sich ausscheidende

Substanz bestimmten Temperaturpunkt erfolgt, daß vielmehr im allgemeinen die Kristallisation derselben Kristallart sich in einem Temperaturintervall vollzieht. Einen bestimmten Erstarrungspunkt haben die reinen Stoffe und die Eutektika. Sonst kann die Kristallisation eines Stoffes Hunderte von Temperaturgraden in Anspruch nehmen, wie das z. B. die Fig. 46 für silberreiche Schmelzen zeigt: im Falle der gestrichelten Linie ganz rechts beträgt das Kristallisationsintervall nicht weniger als 600°.

Lag so das Schema binärer Schmelzen nach Art der obigen so einfach wie möglich, so war nicht zu verkennen, daß in der Natur die Verhältnisse meist viel verwickelter sind. Die Komponentenzahl z. B. der Magmen von Eruptivgesteinen ist zumeist sehr groß, und damit ist die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen außerordentlich gestiegen. Immerhin lassen sich mit Roozeboom u. a. ternäre Systeme im allgemeinen noch in einfache Schemata bringen und manche vielgliedrigen durch die Gunst der Umstände im wesentlichen auf verhältnismäßig wenig komplizierte Diagramme zurückführen.

Es sei auf diese Umstände hier nicht im speziellen eingegangen, aber doch am Beispiel der Kristallisation des Meerwassers einmal dargelegt, wie Fälle, die durch reichliche Komponentenzahl verwickelt sind, sich vereinfachen lassen und ferner daß die Beispiele der Kristallisation von Lösungen wieder wichtige allgemeine Gesichtspunkte eröffnen, wie F. Rinne dartat, auch bezüglich der Verfestigung von Schmelzflüssen.

Das im Meerwasser verkörperte, schon abgesehen von vielen Bestandteilen noch reichhaltige System  $H_2O$ ,  $Cl$ ,  $SO_4$ ,  $K$ ,  $Na$ ,  $Mg$ ,  $Ca$  ist von dem Altmeister der physikalischen Chemie, H. J. van't Hoff (1852—1911), in ein nicht einmal sehr verwickeltes Diagramm gebündelt, das in einer noch größeren Vereinfachung von E. Jänecke und H. E. Böeke ausgearbeitet ist. Der Kunstgriff besteht in der Reduktion der Stoffe auf drei; es sind  $K_2$ ,  $Mg$ ,  $SO_4$ . Er beruht auf der Überlegung, daß  $H_2O$  fortgelassen werden kann, da die Richtung der Kristallisationsbahn von seiner Menge unabhängig ist; sein Verdunsten ist nur der Anstoß zur Kristallisation. Natrium bleibt unbeachtet, da es mit Chlor im Meerwasser in so großer Menge vorhanden ist, daß  $NaCl$  zuerst und weiterhin ständig ausfällt. Chlor wird ausgelassen, da es sich um neutrale Salze handelt, bei denen eine gegebene Menge von  $K_2$ ,  $Mg$ ,  $SO_4$  mit der von  $Cl$  in einfacher Beziehung steht. Schließlich kommt der Sache zugute, daß bei der Gegenwart von  $SO_4$  die  $Ca$ -Salze als Sulfate vorhanden sind, die als schwer lösliche und daher nur in geringer Menge vorhandene Stoffe den Kristallisationsweg der übrigen kaum beeinflussen, vielmehr von ihnen beeinflußt werden. Man kann also Calcium fortlassen, um die Kristallisation seiner Salze in einem vom Diagramm der Stoffe  $K_2, Mg, SO_4$  abhängigen Schema für sich darzustellen.

Die van't Hoff'schen Untersuchungen ergaben, daß die Kristallisation des Meerwassers einem Endpunkt zustrebt, der sich durch die gleichzeitige Bildung von Kieserit ( $MgSO_4 \cdot H_2O$ ), Carnallit ( $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6 H_2O$ ) und Bischofit ( $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$ ) kennzeichnet. Zuvor aber kommt es zur Bildung anderer Mineralien, die gewissermaßen Vorstufen der Endprodukte darstellen.

Besondere Schwierigkeiten der Erkenntnis vieler natürlicher Kristallisationen.

Kristallisation des Meerwassers.

Resorptionen als  
Normalerscheinungen.

Ein in allgemeinsten Hinsicht wichtiger Umstand ist es, daß ein ganz normales Voranschreiten der Kristallisation nicht nur ein Werden, sondern auch ein Vergehen von Kristallen bedeutet. Es erhellen sich dadurch die bei Eruptivgesteinen so häufigen Bildungen teilweiser Resorption früh ausgeschiedener Gemengteile. Solche Auflösungen sind eben vielfach nicht durch besondere Umstände wie Zuflüsse, Druckänderung, Steigerung der Temperatur veranlaßtes Abnormes oder Rückläufiges im Kristallisationszuge, vielmehr eine Erscheinung auf der im alten Sinne regelrecht voranschreitenden Bahn. Die Erstarrung einer komplexen Lösung oder Schmelze kann also ganz normaler Weise, d. h. wenn sich Gleichgewichte zwischen den festen und den noch flüssigen Stoffen bilden, ein oft sehr mannigfaltiges Entstehen und Vergehen von Kristallarten vorstellen, bis schließlich eine bestimmte Paragenese gewissermaßen durch ein langes chemisches Verfahren herauspräpariert ist. In der natürlichen Praxis wird das Gleichgewicht oft nicht erreicht. Vielfach sind in Lösungen die ausgeschiedenen Kristalle der Schwere folgend abgesunken, von anderen überkrustet und so der Einwirkung des Flüssigkeitsrestes entzogen. Bei Schmelzflüssen hinderte oft die große Zähigkeit oder ein allzu schnelles Erkalten eine vollständige Umsetzung.

Anteil der Stoffe  
an der Kristallisationsbahn.

Von anderen wichtigen Kristallisationsumständen, die sich aus dem van't Hoff'schen Diagramm mit Leichtigkeit herauslesen ließen, gültig sowohl für Lösungen als auch für Schmelzflüsse, sei der Anteil der Stoffe an der Kristallisationsbahn erwähnt. Von den Meeressalzen hat immerfort an ihr teil das Steinsalz, es ist ständiger Begleiter der übrigen, andere Salze erscheinen auf Teilstrecken, so der Kainit; sie tauchen plötzlich auf und verschwinden ebenso; wieder andere haben rekurrierende Bildungszeiten.

Einfluß der  
Temperatur.

So war denn durch solche Kristallisationsschemata ein Schlüssel gegeben für die Verhältnisse der Paragenese, d. h. des Zusammenvorkommens der Mineralien. In der Hinsicht wirkt nun aber noch ein Faktor kräftigst mit, das ist die Temperatur. Van't Hoff hat den großen Unterschied gezeigt, den das Kristallisationsschema der Meeressalze für 25° gegenüber dem von 83° aufweist. Beim Übergang von einem zum andern verschwinden gewisse Salze, andere tauchen auf, und auch die Paragenesen werden andere. So wurde erwiesen, daß gewisse Mineralien, oder auch bestimmte Mineralkombinationen förmliche geologische Thermometer sind für die Wärmegrade bei ihrer Bildungszeit. Die Salze Vanthoffit und Langbeinit z. B. verlangen eine Mindesttemperatur in der sie ausscheidenden Lösung von 46° bzw. 37°, die oft gefundene Paragenese von Kieserit und Sylvinit eine solche von 72°. Ähnlich hat man am Quarz ein Zeichen für den Wärmegrad bei seiner Bildung. Der holoedrisch ausschauende  $\beta$ -Quarz z. B. der Quarzporphyre ist über 575°, der rhomboedrisch entwickelte  $\alpha$ -Quarz, etwa der Bergkristall in den Klüften alpiner Granite, unter dieser Temperatur entstanden.

Nicht realisierbare  
Schmelzpunkte.

Ein für die Kristallisation von Schmelzen also für die Deutung der Eruptivminerale hochbedeutendes Schema ist auch das in Fig. 48 gezeichnete Diagramm mit „verdecktem Maximum“. In ihm ist gekennzeichnet, daß der



Schmelzpunkt einer Verbindung  $AB_2$  nicht realisierbar ist; sie zersetzt sich vorher, mithin kann  $AB_2$  sich nicht aus der Schmelze der Zusammensetzung  $AB_2$  aussondern. Beim Erstarren (Absinken des darstellenden Punktes  $I$  auf der Vertikalen) entsteht bei  $H$  zunächst  $B$ ; erst bei der Temperatur von  $D$  wird  $AB_2$  existenzfähig, das sich dann aus  $B$  und der Restschmelze bildet. Oft genug werden Teilchen von  $B$  erhalten bleiben. Und so erkennt man einmal auch hier, daß nur bei vollem Ausreifen der Kristallisation normale Zustände zuwege kommen, und andererseits den Grund, weshalb das Umschmelzen mancher Stoffe nicht wieder zum Ausgangsmaterial, sondern zu Spaltungsmineralien führt. Chemisch identische Schmelzflüsse können sich je nach den Umständen der Erstarrung mineralisch verschieden differenzieren.

Schließlich sei noch ein Vorurteil zerstört, das bei manchen Mineralogen hinsichtlich des Einflusses von „Wasser und anderen Gasen“ im Schmelzfluß wurzelt. Schon das Beispiel der  $H_2O$ - $NaCl$ -Lösung zeigt, daß

Wasser durchaus denselben Gesetzen der Kristallisation bei Temperaturerniedrigung folgt, denen die mit ihm zur Lösung oder Schmelze vereinigten Stoffe gehorchen. Man kann es am ehesten mit dem Quecksilber unter den metallischen Schmelzen vergleichen. Eine quecksilberdurchtränkte Legierung ist aber nichts Abnormes, ebensowenig ein wasserdurchtränktes Magma. In ihm ist ja das Wasser eine feurig flüssige Komponente ganz wie die übrigen mit ihm zur Schmelze verbundenen Stoffe.

Statt zu entweichen, kann sich auch wohl das Wasser in dem mehr und mehr abkühlenden Schmelzrest von Tiefenerstarrungen anreichern, so daß schließlich eine heiße wäßrige Lösung als Mutterlauge übrig ist, die zu „hydrothermalen“ Mineralien sich mehr und mehr verfestigt und schließlich als juveniles, noch nicht im bekannten Kreislauf gewesenes Wasser seine Wanderung in der Erdkruste antritt. Manche Mineralogen sind der Meinung, daß gewisse Pegmatit genannte Gesteine, die sich durch Gemengteile großen Kornes und oft durch eine Fülle besonderer und schön kristallisierter Mineralien, wie Flußspat, Topas, Turmalin usw., auszeichnen, der geschilderten Entstehung sind. Theoretische Erwägungen physikalisch-chemischer Art über diese ungemein wichtigen aber äußerst schwierig zu behandelnden Verhältnisse verdankt man insbesondere P. Niggli und A. Smits.

Der Überblick der Mineralbildung in der Natur aus Lösungen und Schmelzen läßt erkennen, daß hier eine große Mannigfaltigkeit von physikalisch-chemischen Regeln verkörpert ist. Dazu kommt noch, daß der Anstoß zur

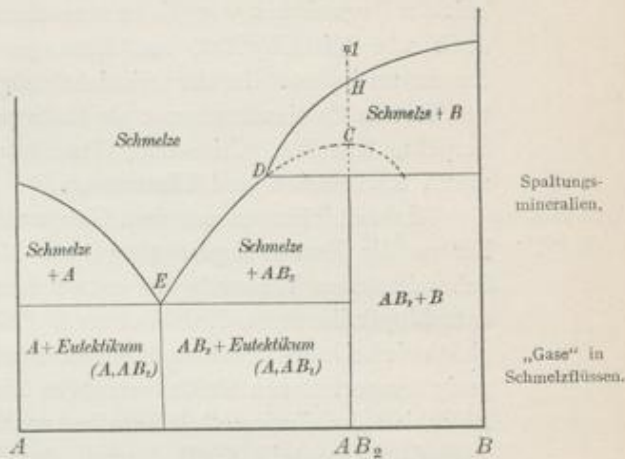


Fig. 48. Kristallisationsdiagramm mit verdecktem Maximum.

Übersicht der natürlichen Kristallisationen aus Lösung und Schmelzfluß.

Kristallisation in der Natur ein sehr verschiedenartiger Umstand ist, sei es, daß man es mit einem Verdunsten des Lösungsmittels zu tun hat, wie bei der Bildung der Salzlager, oder mit einem Absinken der Temperatur, wie bei den Eruptivgesteinen; andernfalls ist es die Änderung des Druckes, so bei aufsteigenden Quellen, oder die Mischung einer Lösung mit Zuflüssen, die Kristallisationen verursacht. In zahllosen Fällen liegt Verfestigung durch die Tätigkeit der Organismen vor, die es verstehen, die geringen Mengen von Carbonaten, auch von Kieselhydrat, aus Lösungen herauszunehmen und ihre Hartteile daraus zu bauen. In der Hinsicht möge nur erinnert werden an die Bildung von festem Calciumkarbonat als Kalkspat oder Aragonit durch Foraminiferen, Serpeln, Korallen, Crinoiden, Muscheln, Algen, von Kieselhydrat als Opal durch Radiolarien und Diatomeen.

Kristallisationen  
aus Gasen.

Mineralbildungen aus dem Gaszustand der Materie schließen sich unmittelbar an die Erstarrungsvorgänge von Magmen an. Nicht nur kann aus den Schmelzflüssen Wasserdampf entweichen, sondern auch mancher andere Stoff entschlüpft ihnen, so Kohlendioxyd, Chlor, Natrium, Kalium, Eisen, Mangan, gleichwie bei künstlichen hochtemperierten Schmelzen der Hüttenbetriebe. Solche gasig ausgestoßenen Stoffe vermögen sich miteinander umzusetzen und beim Abkühlen „sublimierte“ Mineralien zu bilden, etwa Kochsalz ( $\text{NaCl}$ ), Salmiak ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), Zinnstein ( $\text{SnO}_2$ , nach der Gleichung  $\text{SnF}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{SnO}_2 + 4 \text{HF}$ ), Eisenglanz ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), auch Silikate wie Topas, Fayalit u. a. „pneumatolytische“ Mineralien mehr.

Kristallisationen  
in festen Stoffen.

Eine Kristallisation bereits fester Stoffe durch Umstehen ist jedem Chemiker bekannt. Gläser können entglasen, amorphe Niederschläge kristallin werden, abgeschreckter Martensit (Eisen mit gelöstem Eisenkarbid) differenziert sich beim Erwärmen (Anlassen) in Ferrit ( $\text{Fe}$ ) und Cementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ); Meteoreisen hat sich im festen Zustande aus einer gleichmäßigen Eisennickellegierung in ein Gemenge von Kamazit (nickelarmem Eisen) und Taenit (nickelreichem Eisen) verwandelt. Ein Umstehen ist auch der Übergang einer Modifikation eines Stoffes in eine andere, etwa die Wandlung des bei hoher Temperatur stabilen  $\beta$ -Quarzes in  $\alpha$ -Quarz, wenn der Wärmegrad z. B. beim Erkalten eines Porphyschmelzflusses mit ausgeschiedenen Quarzeinsprenglingen unter  $575^\circ$  fällt. Von hohem Interesse ist in der Hinsicht die Entstehung von Kriställchen in fester kristalliner Materie durch Ausscheidung einer vorher gleichmäßig verteilten Substanz in besonderen Kristallisationszentren. So wird man mit A. Johnsen das Vorkommen orientierter Hämatitblättchen im Oligoklas von Tvedestrand oder im roten Carnallit auffassen können. Trotz festen Zustandes des Hauptstoffes haben sich in ihm zahlreiche wohlgebildete Eisenglanzkrystalle entwickelt, eine im Grunde sehr seltsame Erscheinung. Ähnliches kann man sich, beiläufig gesagt, nach H. Schreiber am Syngenit vorführen, der beim Erhitzen explosionsartig in zweierlei feste, z. T. mit schönen Flächen umgebene mikroskopische Kristallarten zerfällt.

Mit der Darlegung der allgemeinen Verhältnisse auf dem weiten Forschungsgebiete der Entstehung kristalliner Stoffe muß es hier sein Bewenden haben,

so verlockend es auch erscheinen mag, den Spuren großer Experimentatoren noch weiter zu folgen, die sich der Kristall- und insbesondere der Mineralsynthese gewidmet haben. Eine Pflicht der Dankbarkeit ist es aber, die Namen einiger Führer auf diesem Felde der mineralogischen Wissenschaft herauszuheben. Und so sei denn außer dem Hinweis auf die bereits oben genannten Forscher noch erinnert an die schönen Erfolge von Wöhler, Senarmont, v. Schulten, Maçé, Debray, Bruhns, Vater, die in mannigfachster Art Kristallisationen aus Lösungen erzielten, an die klassischen Schmelzversuche von Fouqué und Michel Lévy, denen die Darstellung vieler Minerale der Eruptivgesteine gelang, an Bourgeois, Hautefeuille, Ebelmen, Moissan, an die Sublimationskristallisationen von Ste. Claire-Deville, Durocher, Daubrée, Meunier, Frémy, Verneuil. Die Zahl der Forscher und ihrer glänzenden Ergebnisse ist zu groß, um hier auch nur im Überblick gebührend gewürdigt zu werden. Eins tritt aus der großen Fülle von Namen aber bereits heraus, daß es insbesondere Frankreich gewesen ist, in dessen Laboratorien zahlreiche und bedeutsame Erfolge auf dem Gebiete der Mineralsynthese erzielt sind.

V. Metamorphosen im Mineralreich. — Verwitterung, Kontakt-<sup>Allgemeine Ursache der Umwandlungen.</sup>wandlung und Regionalumänderung. Der Kristallisationsakt ist im allgemeinen als Dokument eines Gleichgewichtes aufzufassen. Ein aus erkaltender andesitischer Schmelze sich bildender Hornblendekristall z. B. ist mit den äußeren Umständen in Harmonie, sonst würde er eben nicht entstehen. Schon im Laufe der fortschreitenden Verfestigung des Magmas aber kann er unbeständig werden und der Zerstörung anheimfallen, wie es Reaktionsränder und in den Kristall sich erstreckende Lösungsbuchten zeigen. Noch mehr weichen die äußeren Verhältnisse von den Entstehungsumständen ab, wenn das bei hoher Temperatur gebildete Gestein den Verwitterungsagentien der Erdoberfläche, dem Wasser, der Kohlensäure, dem Sauerstoff, bei niederen Wärmegraden ausgesetzt wird. Es bilden sich neue Gleichgewichte heraus, die Hornblende wandelt sich zu Chlorit und in Lösung gehende Stoffe um, weiter wohl zu Brauneisenerz, Quarz u. a. m. Entsprechend regt es sich in Tausenden von anderen Fällen, die Beispiele sind für die Entstehung neuer Formen der anorganischen Materie zufolge der Änderung äußerer Umstände.

Besonders lehrhafte Belege sind in der Hinsicht die Pseudomorphosen, die von R. Blum eine vortreffliche monographische Bearbeitung erfahren haben. Bei ihnen ist die Kristallgestalt des ursprünglich vorliegenden Materials erhalten geblieben, der chemische Inhalt aber ein anderer geworden. Als ein berühmtes Beispiel sei erwähnt die Pseudomorphose von Speckstein nach Quarz. Die Form des Ausgangsmaterials ist noch gut zu erkennen, sein Kristallgebäude besteht aber nicht mehr aus Kieseldioxyd, sondern aus Magnesiumhydrosilikat. <sup>Pseudomorphosen.</sup>

Den sog. Paramorphosen liegt ein Umstehen unter Erhaltung der chemischen Zusammensetzung zugrunde. Es kommt das beim Calciumkarbonat vor, wenn dessen ursprüngliche Aragonitnatur sich zu Kalkspat verwandelt.

Verwitterung. Von chemischen Änderungen durch Verwitterung seien folgende als die wichtigsten, weil verbreitetsten genannt. Es rechnen dahin Vorgänge, die eine Versteinung des Wassers bedeuten, so die Gipsbildung aus Anhydrit ( $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), die Limonitisierung der Eisenerze ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ ). Ganz außerordentlich bedeutsam hinsichtlich Materialbewältigung ist die natürliche Aufschließung der Silikate, die man früher allgemein gewissermaßen als einen Kampf der Kohlensäure gegen die Kieselsäure auffaßte, der zugunsten ersterer sich entwickelte, den sich aber manche Forscher jetzt mehr als eine Hydrolisierung vorstellen, deren Fortgang durch die Bildung löslicher Karbonate beschleunigt wird. In erster Linie steht in der Hinsicht die Kaolinisierung, die insbesondere die Feldspate (z. B.  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) erfaßt, und bei der, wie auch bei anderen Verwitterungsvorgängen sich oft kolloidaler Ton bildet. Verwandt erscheint die Entstehung von noch Alkali haltendem Muscoviten, energischer noch als diese Umwandlung ist die in den Tropen häufige Lateritisierung, deren Endziel, wie M. Bauer nachwies, durch Eisenhydroxyd oft kräftig gefärbtes Tonerdehydrat ist. Die dunklen Glimmer werden enteisent, sie hellen auf, verlieren Alkali, Magnesium, Tonerde und sind gewissermaßen auf dem Wege zur Bildung von Kieselhydrat, ein verbreiteter Vorgang, der als Baueritisierung bekannt ist. Andererseits entsteht aus den dunklen Glimmermineralien, gleichwie aus Augit und Hornblende Chlorit, Serpentin, auch Talk. Dieser Wechsel in der Natur des Verwitterungserzeugnisses, wie sie ersichtlich



Fig. 49.

Verwitterung von Olivin zu Serpentin.  
Dünnschliff unter dem Mikroskop.

beim selben Mineral erscheinen, hängt wohl von der chemischen Art der Lösungen ab, die es auslaugen. Wären sie z. B. an Magnesium gesättigt, so erscheint keine Möglichkeit, diesen Stoff aus dem verwitternden Mineral auszuziehen, während Alkali und Eisen ihm verloren gehen. Die Verwitterung würde zur Bildung von Magnesiumhydrosilikat (Talk) führen; zur Kaolinisierung andererseits, wenn von den Basen lediglich Aluminium am Austritt verhindert würde, und ähnlich in anderen Fällen. Von besonderer Bedeutung ist die Serpentinisierung des Olivins ( $2 \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow 3 \text{MgO} \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), wobei auch das in ihm enthaltene Eisensilikat entsprechend dem des Magnesiums sich umsetzt oder auch zur Entstehung kräftig färbenden Eisenoxyds und Eisenoxyduloxyds Veranlassung gibt. Fig. 49 gibt ein anschauliches und lehrhaftes Bild von den mikroskopischen Verhältnissen dieses Vorganges. Man erkennt wie er sich auf zahlreichen maschigen Wegen in das Silikat förmlich einfrisst.

Die ersichtlich recht mannigfaltige Art der Verwitterungserscheinungen wird noch bunter durch Neubildungen aus den Lösungen, in die ein Teil der sich

wan  
spat  
So g  
Kies  
Blas  
nate  
witt  
wo  
z. B  
kam  
lage  
wie  
Sylv

gäng  
tief  
dem  
Tem  
der  
Ch  
seie  
u. a  
und  
von

auf  
inso  
Die  
steh  
groß

wes  
J. F  
ket  
fläch  
sili  
der  
groß  
abs  
kan  
die  
Ton  
kan  
für

wandelnden Substanz hineingeht. Beim Kaolinisieren wird ein Teil der Feldspat Kieselsäure in Lösung zur Verfügung gestellt, beim Serpentinisieren Magnesia. So gesellt sich denn zum Serpentin der Magnesit ( $MgCO_3$ ); andernorts setzt sich Kieselsäure als Quarz ( $SiO_2$ ) oder Opal ( $SiO_2, H_2O$ ) ab, und auf Spalten in Blasenräumen und in sonstigen Hohlräumen von Gesteinen entstehen Karbonate insbesondere von Calcium. Überraschend ist die Mannigfaltigkeit der Verwitterungserscheinungen am Ausgehenden von Erzlagern, im „eisernen Hut“, wo vor allem der Eisengehalt sich durch braungelben Limonit anzeigt, oder z. B. Malachit den Kupfergehalt der in der Tiefe ruhenden natürlichen Schatzkammer verrät. In ähnlicher Art deuten sich zahlreiche Wandlungen von Salzlagerstätten durch den „Salzhut“ an, der vor allem auf steil stehenden Lagerstätten wie eine prächtige, bunte Kappe mit hellem Kainit, blauem Steinsalz, milchigem Sylvin und anderen posthumer Mineralien sitzt.

Hier ist nun auch der Platz zu betonen, daß den erdoberflächlichen Vorgängen der Verwitterung entsprechende Wandlungen in etwas größerer Erdtiefe unter dem Einfluß von Thermen sich abspielen und daß sie sich dort unter dem kräftigen Ansporn, den chemische Umsetzungen durch Erhöhung der Temperatur erfahren, schneller vollziehen als in der kühleren äußersten Zone der Erdkruste bzw. an ihrer Oberfläche. Die Meinung aber, daß Kaolinisierung, Chloritisierung, Serpentinisierung stets Anzeichen solcher Tiefenveränderung seien, ist sicher verfehlt. Durch eingehende Studien von C. Gagel, H. Stremme u. a. ist z. B. erwiesen, daß Kaolinisierung auch durch kalte Sauerlinge erfolgt, und sehr wahrscheinlich gemacht, daß die Bildung vieler Kaolinlager durch von oben aus Braunkohlenlagern einsickernde Wasser sich vollzog.

Ist also die Möglichkeit für die nämlichen chemischen Umwandlungen auf der Oberfläche wie in der Haut der Erde vorhanden, so ist allerdings dabei insofern ein Unterschied, als die physikalische Art des Produktes wechselt. Die Zone der Verwitterung, die oberste Schale mit ihren erdigen, zarten Stoffen steht im Gegensatz zu den Tiefenwandlungen mit ihren deutlichen, ja oft genug großkristallinen Bildungen.

Die Grenzzone zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre ist wesentlich die Sphäre der Bildung kolloidaler Stoffe, der Gele. Sie haben nach J. F. A. Breithaupt (1791—1873) erst spät wieder gebührende Aufmerksamkeit gefunden, als H. Stremme und F. Cornu ihre Bedeutung für die oberflächliche Zone der Erde heraushoben. Man findet Gele in der Gruppe der silikatischen Neubildungen, vor allem als Ton, ferner in den Oxydationszonen der Erzlagerstätten, wo insbesondere Eisenhydroxydgel (Stilpnosiderit) eine große Rolle spielt, im Aluminiumhydroxyd des Bauxits, in den Kieselsäureabsätzen der Thermen, auch bei Phosphaten, Arsenaten, Sulfiden. Natürlich kann man ihnen keine bestimmte chemische Formel zuerkennen; sie ist für die kristallinen Stoffe gültig, die jeweils zu dem Gel gehören, wie Kaolinit zu Ton, brauner Glaskopf zum Stilpnosiderit, Quarz zum Opal. Durch „Umstehen“ kann aus dem Kolloiden das Kristalline sich entwickeln, was B. Doss z. B. für die Eisenkieslager bewies.

Sphären der  
Umwandlung.

Gelbildung.

Kontaktmetamorphose. In eigenartige Verhältnisse muß sich unsere Vorstellung versenken bei der Betrachtung der Wandlung von Mineralien durch Kontaktmetamorphose. Es handelt sich dabei um Änderungen, die sich in der Nähe von natürlichen feurigen Schmelzflüssen abspielten, seien letztere nun, wie in den alten archaischen Zeiten der Erde, ein gleichmäßiger Magmenherd, oder, wie später, in gewaltigen Aufschmelzzonen empordringende Massen oder seien sie als verhältnismäßig kleine Eruptive zu denken, die in die äußere feste Hülle der Erde gepreßt wurden. So sind vielfach Granitmassen, wie der Brocken im Harz, Granitberge im Erzgebirge, in den Vogesen und sonst von gelegentlich mehrere Kilometer breiten „Kontakthöfen“ umgeben. Die Stärke der Umwandlung des Nebengesteins klingt natürlich von der Granitgrenze aus gerechnet nach außen ab. Aller Wahrscheinlichkeit nach hat man es in diesen metamorphosierten Zonen mit Umänderungen zu tun, deren Ursache erhöhte Temperatur sowie aus den Schmelzflüssen in das Nebengestein z. T. wohl im kritischen, also äußerst fluiden Zustande eindringende Lösungen bzw. Gase waren. Eine ihrer kräftigsten Wirkungen, die Umwandlung von kristallinen Schiefen zu Feldspataggregaten (Sanidiniten) u. a. hat R. Brauns als Pyrometamorphose gekennzeichnet. Anderenfalls kam es durch Thermometamorphose, wie F. Rinne und H. E. Boeke auf Grund experimenteller Nachahmung die einschlägigen Erscheinungen benannten, lediglich zu einem Umkristallisieren unter Vergrößerung des Kornes, also zu einer Sammelkristallisation. Dafür ist die Marmorisierung von dichten Kalksteinen das verbreitetste Beispiel. Vielfach sind durch Wechselwirkung der Gesteinsbestandteile unter sich und mit den zugeführten Stoffen neue Mineralien von oft großer Mannigfaltigkeit und Schönheit entstanden. In der Art zu erklären sind manche herrlichen Funde von Granat oder Vesuvian in Marmor, von Andalusit in Tonschiefern u. a. m. Brauneisenerz wandelt sich durch Kontaktmetamorphose in Magnetit um, bituminöse Substanz in Graphit. Auf Dampfentwicklungen der Schmelzflüsse und entsprechende Umsätze deuten hin die pneumatolytischen Bildungen von Flußpat, Zinnstein, Turmalin. Insbesondere waren die den Magmen entströmenden Agentien offenbar im Kalkstein wirksam, der als Calciumkarbonat zu vielerlei Reaktionen neigt, mehr als die silikatischen Mineralien. So mögen nach V. M. Goldschmidt Umsetzungen wie  $2 \text{FeF}_3 + 3 \text{CaCO}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CaF}_2 + 3 \text{CO}_2$  vor sich gegangen sein. Recht charakteristisch ist nach ihm bei der Wandlung von Kalkstein auch die Herausbildung der „Skarnmassen“ mit ihrem Kalkeisengranat (Andradit) und Hedenbergit. Offenbar sind viele Erzlagerstätten an solche Umstände gebunden; die Eruptivgesteine sind Erzbringer; ihre Emanationen veranlaßten die Bildung von Bleiglanz, Zinkblende, Kupferkies, Gold- und Silbererzen, wie das ganz besonders deutlich im vulkanischen Andenzuge heraustritt.

Schon diese Andeutungen der Erscheinungen, welche sich als Gefolge der Verfestigung natürlicher Schmelzflüsse abspielen, zeigen die große Mannigfaltigkeit der Bildungen an. Vom physikalisch-chemischen Standpunkte erwecken sie das höchste Interesse; sind sie doch Zeugnisse, die allmählich überleiten

Pyrometamorphose. Thermometamorphose.

Pneumatolytische Bildungen.

von den Erstarrungen der feurigen Magmen als einem Extrem, zum anderen Gegenstück, den wäßrigen Bildungen, in denen die Eruptionstätigkeit ausklingt und die sich z. B. dokumentieren durch die seltsamen Zeolithe in den Blasenräumen von Erstarrungsgesteinen und die Kieselsinterablagerungen vulkanischer Bezirke.

Einen erfolgreichen Versuch, die Erscheinungen der Kontaktmetamorphose unter den allgemeinen Gesichtspunkt, wie ihn die Gibbssche Phasenlehre vorstellt, zu bringen, hat V. M. Goldschmidt (1910) gemacht. Es stellt sich nach ihm heraus, daß man es mit Gleichgewichten zu tun hat, regiert von der „mineralogischen Phasenregel“; sie besagt, daß die maximale Anzahl der festen Mineralien, die gleichzeitig nebeneinander stabil vorkommen können, gleich der Anzahl der Komponenten ist, die in den Mineralien enthalten sind. So können z. B. höchstens je 5 Produkte stabil nebeneinander erscheinen, wenn man es mit den Komponenten  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{SiO}_2$  zu tun hat.

Mineralogische  
Phasenregel.

Regionalmetamorphose. Für noch gewaltiger an naturgeschichtlicher Bedeutung als die Erscheinungen der Kontaktumwandlung schätzt man heute die der Regionalmetamorphose. Nach der Meinung vieler Forscher fällt dies Thema zusammen mit dem Studium der Entstehung der in der steinernen Erdkruste so ungemein weit verbreiteten „kristallinen Schiefer“, der Gneise, Glimmerschiefer, Phyllite und ihrer mannigfachen Einlagerungen. Daß in ihnen zum großen Teil in der Erdtiefe umgewandelte Eruptivgesteine bzw. Sedimente vorliegen, ist nicht mehr zweifelhaft. Nach den Lehren der Regionalmetamorphose handelt es sich bei ihnen um die Wirkungen eines Tiefenlaboratoriums der Erde, in welches unter ganz anderen Verhältnissen, z. B. auf der Erdoberfläche gebildete Mineralaggregate durch Überlagerung gerieten. In 10000 m oder 20000 m Tiefe, also in Abständen von der Erdoberfläche, die geologisch gedacht gering sind, wird die Temperatur etwa 300 bzw. 600° betragen, ein Gesteinsdruck von rund 2700 bzw. 5400 kg/qcm herrschen und wird sich Wasser in überhitztem Zustande befinden. Es ist verständlich, daß unter solchen Umständen an den Mineralien namhafte Wandlungen sich vollziehen, seien es wiederum Erscheinungen des Umstehens von Kolloiden in kristalline Stoffe, Vorgänge der Sammelkristallisation oder der Bildung neuer kristalliner Mineralien.

Ein eigenartiges Charakteristikum vieler regionalmetamorpher Mineralverbände ist es, daß sich eine Reihenfolge der Bildungen, wie sie sich bei Eruptivgesteinen meist deutlichst heraushebt, nicht zeigt. Es ist das wohl die Folge davon, daß die Vergesellschaftung der Gemengteile kristalliner Schiefer der Ausdruck eines einzigen äußeren Umstandes ist, während bei den Eruptiven, die unter dem Einfluß sich fortgesetzt ändernder Temperatur erstarrten, viele nicht resorbierte Reste früherer Gleichgewichte erhalten blieben, insbesondere bei den sich verhältnismäßig schnell verfestigenden Oberflächenergüssen und Explosionserzeugnissen.

Mangelnde Aus-  
scheidungsfolge  
bei metamor-  
phen Gesteinen.

Nicht zu verkennen ist es, daß die Umstände der Regionalmetamorphose sich dem Endstadium der Schmelzflußerstarrung mit ihren hydrothermalen

Vergleich  
hydrothermalen  
Eruptive und  
metamorpher  
Gesteine.

Bildungen, z. B. von Pegmatit, nähern. So kann es zur Entstehung ähnlicher Stoffe kommen, wie sie in den Schlußbildungen der Erstarrungsgesteine vorliegen. Der Feldspat z. B., der unter den Bedingungen des Magmas in seinem normalen Existenzbereich war, der es aber nicht ist unter der Herrschaft des Wassers, der Kohlensäure, des Sauerstoffs bei niedriger Temperatur und hier zerfällt, wird in den Gesteinen der Regionalmetamorphose regeneriert. In dieser Annäherung an die Verhältnisse der Magmen stehen sich Regionalmetamorphose und Kontaktwandlung nahe; als besonderer Umstand kommt aber bei ersterer, wie schon erwähnt, die Wirkung des Druckes hangender Gesteinsmassen hinzu.

Zwangskristallisation.

Da erscheint es verständlich, daß sich regionalmetamorph neu bildende lamellare oder stengelige Minerale dem von oben wirkenden Drucke anpassen, sich also horizontal gestreckt in Gleichgewichtsstellung ausbilden. Das besagt der von F. Rinne für solche Vorgänge vorgeschlagene Name der Zwangskristallisation.

Kristallisationschieferung.

Andererseits ist von F. Becke, F. Berwerth und U. Grubenmann auf die Bedeutung des sog. Rieckeschen Prinzips für die Herausbildung der Schieferstruktur hingewiesen. Danach werden die mechanisch beanspruchten Stellen eines Kristalls löslicher als die nicht gespreßten oder gezerzten. Es wird also beim hangenden Druck ein in seiner Mutterlauge befindlicher Kristall oben und unten durch Auflösung sich verdünnen und seitlich wachsen, da die Lösung dort unter-, hier übersättigt wird. Die genannten Forscher haben diesem merkwürdigen, experimentell allerdings noch nicht bestätigten Vorgange den Namen Kristallisationsschieferung gegeben.

Volumengesetz.

Von großem Interesse war es, zu erkunden, ob, wie anzunehmen, der gewaltige Druck, den man bei der Entstehung der kristallinen Schiefer voraussetzt, sich zugunsten der Bildung besonders schwerer Mineralien geltend gemacht hat; in solchen ist ja viel Materie in kleinem Raum vereinigt und somit der Stoff dem äußeren Druck am besten angepaßt. In der Tat konnten R. Lepsius, F. Becke und A. Heim darauf verweisen, daß Umbildungen in kristallinen Schiefen im allgemeinen unter Volumverkleinerung verlaufen, daß also in ihnen Mineralien mit hohem Eigengewicht eine bevorzugte Rolle spielen. Es ist aber O. Mügge gewiß beizupflichten, wenn er volle Klarheit der Verhältnisse vermißt und bekundet, daß sich auch Ausnahmen von der Regel zeigen, so das häufige Vorkommen von Kalkspat (Marmor) mit  $G = 2,7$  anstatt des von Aragonit ( $G = 2,9$ ). Eine Erklärung für diese Abweichung ließe sich im Hinblick auf die erhöhte Temperatur bei der Metamorphose finden, die der Bildung von Kalkspat günstig ist.

Tiefenstufen der Regionalmetamorphosen.

Die Art der sich neu bildenden Mineralien wird von der Stärke der hier wesentlich in Betracht kommenden sich oft entgegenwirkenden Ursachen, der Höhe der Temperatur und des Druckes, abhängen, so daß gewisse Tiefenstufen sich herausheben werden. In der Tat hat F. Becke eine untere und obere Stufe der Regionalmetamorphose unterscheiden können. In der ersten ist die Bildung hydroxylreicher Mineralien ausgeschlossen, in der oberen tritt der Temperatureinfluß mehr zurück, und es konnten hier auch wasserhaltige Stoffe wie Chlorit entstehen. U. Grubenmann gliedert drei Stufen voneinander.



Dasselbe Gestein wird nach ihm, den wechselnden Bedingungen der Tiefenlage entsprechend, zu einem dreifach verschiedenen Erzeugnis werden je nach der Teufe, in der es seine Wandlung erfährt. Ein Diabas mag sich in den höheren Horizonten durch Chloritisierung des Augits und Epidotisierung seines Feldspats zu einem Epidotchloritschiefer verändern, in der mittleren Zone durch Umwandlung des Augits in Hornblende und teilweises Bestehenbleiben des Plagioklas zu einem Plagioklasamphibolit verwandeln, in der tieferen Region ist der Augit beständig, Granat bildet sich neu, so daß sich ein Eklogit entwickelt.

Anhangsweise sei noch einer Metamorphose gedacht, die zuerst der Verfasser erwog und die Svante Arrhenius bei den Kalisalzlagern Deutschlands voraussetzt. Auch diese, einst im Lichte der Dyassonne aus einem Salzsumpfe abgeschiedenen, oft wasserhaltigen Mineralien sind durch Überlagerung in tiefere also heißere Zonen der Erdkruste gerückt. Es ist daher nicht unmöglich, daß mancherlei chemische Änderungen nachträglich im Salzbestande vor sich gingen, daß gewisse Salze verschwanden und neue entstanden, insbesondere auch, daß die sedimentäre Lagenstruktur zufolge des wäßrigen Erweichens und des Zusammensackens der Massen sich verwischte.

Metamorphose  
der Salzlager.

#### Beziehungen zwischen dem chemischen und dem physikalischen sowie geometrischen Wesen der Kristalle.

Die Auffassung, jeder Stoff sei durch eine ihm zugehörige kristallographische Form gekennzeichnet, soweit nicht das isometrische System mit seiner Einheitlichkeit der Winkelverhältnisse in Betracht komme, ist mit R. J. Haüy zu Grabe getragen. Die großen Entdeckungen F. E. Mitscherlichs (1794—1863) lenkten die Ausblicke weit über diesen Vorstellungskreis hinaus. Und immer noch sind die von dem berühmten Forscher in den ersten Jahren seiner wissenschaftlichen Betätigung aufgestellten Thesen über Polymorphismus und Isomorphismus die Grundlagen von Erwägungen über die Verknüpfung der chemischen Verhältnisse mit den physikalischen und geometrischen Eigenschaften der kristallisierten Materie.

I. Polymorphismus. Die Lehre von der Polymorphie knüpft an die überraschende Erkenntnis M. H. Klaproths (1788) an, daß der orthotrimetrische Aragonit und der rhomboedrisch-hemiedrische Kalkspat derselben chemischen Art, nämlich Calciumkarbonat seien. Haüys Meinung darüber war: „Si c'était là le dernier mot de la chimie, il foudrait en conclure que la difference d'environ  $11\frac{1}{2}^{\circ}$ , qui existe entre les angles primitifs des deux substances, est un effet sans cause, ce que la saine raison désavoue“. Er hoffte, daß doch noch chemische Verschiedenheiten der beiden Substanzen gefunden würden. In der Tat schien die Erklärung durch den Befund Stromeyers (1813), daß Aragonit auch Strontiumkarbonat enthalte, gegeben zu sein; das Strontiumsalz sollte eine so große Kristallisationskraft besitzen, daß es auch die mit ihm verbundenen großen

Aragonit und  
Kalkspat sowie  
andere Beispiele.

Mengen von Kalksalz in seine Form banne, ähnlich wie der sog. kristallisierte Sandstein von Fontainebleau in der Tat seine Gestalt von der verhältnismäßig geringen Menge Kalkspat hat, die eine Unzahl von Sandkörnchen umschließt. In Wirklichkeit handelt es sich aber beim Strontiumgehalt der Aragonite gar nicht um Wesentliches, sondern um Gelegentliches. Kalkspat und Aragonit sind trotz verschiedener Gestalt und verschiedenem physikalischen Wesen von gleicher allgemeiner chemischer Art. Und wie das Calciumkarbonat, so haben viele andere Stoffe die Eigenschaft des Dimorphismus. Sei an den Schwefel erinnert, dessen aus Lösung in Schwefelkohlenstoff erhaltene Kristalle orthotrimetrisch sind, während das Erstarrungsprodukt der Schmelze dem monoklinen System angehört, an den Kohlenstoff mit seinen Modifikationen als Graphit und Diamant, an das Eisenbisulfid, das in der Natur als Eisenkies und als Markasit vorkommt. Trimorph ist das Titandioxyd, es erscheint als Rutil, als Anatas und als Brookit, sogar hexamorph das Siliciumdioxyd ( $\alpha$ -Quarz,  $\beta$ -Quarz,  $\alpha$ -Tridymit und  $\beta$ -Tridymit,  $\alpha$ -Cristobalit und  $\beta$ -Cristobalit), vom Schwefel schließlich kennt man jetzt fünf kristalline Modifikationen. Sei noch vermerkt, daß polymorphe Arten, sogar bis zu vier, auch bei den flüssigen Kristallen angetroffen wurden. Jeder von ihnen, wie allen polymorphen Sorten eines Stoffes, muß man eine besondere Kristallstruktur zuschreiben.

Vergleich der  
Modifikationen.

Natürlich interessierte es, die Eigenschaften solcher wechselnder Ausbildungen desselben Stoffes zu vergleichen. Da fiel dann gelegentlich wohl auf, daß bei der Verschiedenheit der Formen doch auch ein Anklang in geometrischer Hinsicht herrscht. Ist der Kalkspat hexagonal, so ist der Aragonit mit seinem Prismenwinkel von  $116^{\circ}12'$  pseudohexagonal, und Drillinge des Minerals kommen Kalkspat sogar sehr nahe.  $\alpha$ -Quarz und  $\beta$ -Quarz unterscheiden sich um nur ein paar Minuten in den Winkeln, beim Übergang des orthotrimetrischen verzwillingten  $\beta$ -Borazits in den isometrischen  $\alpha$ -Borazit ist gar keine geometrische Änderung wahrzunehmen. In anderen Fällen des Polymorphismus aber ließ sich eine solche enge geometrische Beziehung nicht auffinden. Die Kristallstrukturen, deren geometrischer Ausdruck ja in den Winkelverhältnissen liegt, weichen ersichtlich dann stark voneinander ab.

Auch im übrigen Verhalten polymorpher Körper, sei es hinsichtlich der spezifischen Wärme der Modifikationen, ihrer Dichte, Optik oder sonstigen physikalischen Verhältnisse, ist es noch nicht gelungen, allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten aufzufinden; immerhin sind viele interessante Einzelheiten bezüglich solcher Umstände bekannt geworden. Die Einleitung in die chemische Kristallographie von P. v. Groth (1904) gewährt in der Hinsicht einen sehr wertvollen Überblick.

Enantiotropie  
und Monotropie.

Eine Gruppierung der Verhältnisse versuchte O. Lehmann, dem eine Fülle von Erfahrungen auf diesem Gebiete zur Verfügung steht. Er teilte die polymorphen Körper in enantiotrope und monotrope, je nachdem die Umwandlung der einen in die andere Modifikation umkehrbar ist oder nicht. Beispiele sind einerseits Schwefel, Jodsilber, Borazit, Leuzit, andererseits Benzophenon. In der Tat ist aber ein solcher Unterschied nicht so wesentlich, wie es erscheinen

möchte, was schon O. Lehmann vermutete und W. Ostwald und K. Schaum näher kennzeichneten. Wird in Fig. 50 auf der Horizontalen die Temperatur  $t$ , auf der Vertikalen der Dampfdruck  $p$  aufgetragen, so mag  $\alpha US_\alpha$  die Tensionskurve für die Modifikation  $\alpha$ ,  $\beta US_\beta$  die für  $\beta$  und  $\gamma S_\beta S_\alpha$  die der Schmelze desselben chemischen Stoffes darstellen.  $U$  ist der Umwandlungspunkt,  $S_\alpha$  und  $S_\beta$  geben die Schmelzpunkte für  $\alpha$  und  $\beta$  an. Stabil ist jeweils die Modifikation mit niedrigerem Dampfdruck, die mit höherer Tension stellt einen instabilen oder besser gesagt metastabilen Zustand dar. Und so ist bei Verhältnissen wie in Fig. 50 die umkehrbare Umwandlung  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  gegeben, denn bei Temperaturen unter der von  $U$  ist  $\beta$  stabiler,  $\alpha$  bei solchen über  $U$ . Die Linie der größeren Stabilität, welcher der Stoff bei Erhöhung seiner Temperatur folgt, ist mithin der gebrochene Kurvenzug  $\beta US_\alpha$ , beim Absinken des Wärmegrades ist es  $S_\beta U \beta$ . Solche Enantiotropie kann sich natürlich aber nur dann verwirklichen, wenn  $S_\alpha$  und  $S_\beta$  bei höheren Wärmegraden liegen als  $U$ . Sehr wohl mag unter Umständen aber der Temperaturpunkt von  $U$  jenseits der Kurve  $\gamma S_\beta S_\alpha$  sich befinden (Fig. 51).

Dann ist im ganzen Existenzbereich des festen Stoffes  $\beta$  die stabilere Modifikation;  $\alpha$  kann in  $\beta$  verwandelt werden; der umgekehrte Vorgang ist nicht möglich, denn der Übergang von  $\beta$  in  $\alpha$  wird durch vorzeitiges Schmelzen vereitelt. Wie wenig verschieden aber Enantiotropie und Monotropie im Grunde sind, zeigt die Überlegung, daß der Druck die Lage der in Rede stehenden Kurven beeinflusst. Ersichtlich würde ein Herunterdrücken der Kurve  $\gamma S_\beta S_\alpha$  unter die Höhe von  $U$  einen enantiotropen Körper zu einem monotropen stempeln. Es sind also nur äußere Umstände, nicht Verschiedenheiten des inneren Wesens, die den Gegensatz der Umkehrbarkeit und des nur einseitigen Verlaufes der Modifikationsänderung mit sich bringen.

Für die allgemeine Auffassung all dieser merkwürdigen Verhältnisse des Kristallpolymorphismus war die Betonung noch eines anderen Gegensatzes, nämlich des zwischen chemischer und physikalischer Isomerie, von hoher Bedeutung. Besonders die Darlegungen von W. Ostwald und K. Schaum haben in der Hinsicht aufklärend gewirkt. Es handelt sich wesentlich um folgendes. Bezeichnet man mit J. Berzelius Stoffe beliebigen Aggregatzustandes, die gleiche Zusammensetzung, aber verschiedene Eigenschaften haben, als isomer, so ist im besonderen der Unterfall chemischer Isomerie durch die Verschiedenheit, der Fall physikalischer Isomerie hingegen durch Identität der chemischen Einzelmolekeln der betreffenden Körper gekennzeichnet. Chemische Isomerie ist nicht an einen besonderen Aggregatzustand gebunden, im allgemeinen tritt

Chemische und physikalische Isomerie.

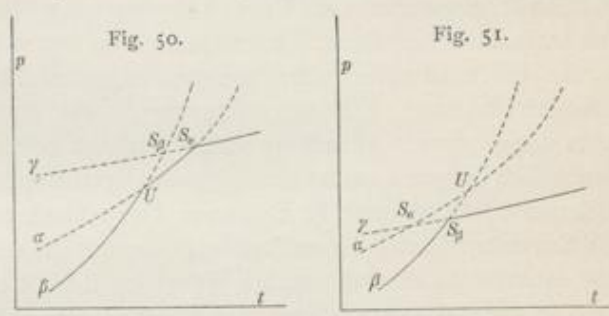


Fig. 50 und 51. Erläuterung der Verwandtschaft von Enantiotropie und Monotropie.

vielmehr die Gegensätzlichkeit der Isomeren sowohl im festen als auch flüssigen und gasigen Zustande der Stoffe auf. Es wächst dann natürlich eine kristalline Modifikation einer isomeren Substanz im unterkühlten Schmelzfluß, bzw. in der übersättigten Lösung oder im unterkühlten Dampf der zweiten Modifikation nicht weiter, so wenig wie chemisch ganz und gar verschiedene Körper, etwa Schwefel und Kochsalz. Eine Ausnahme machen gewisse chemisch isomere Stoffe, die sich in Schmelzen, Lösungen und Dämpfen teilweise ineinander umwandeln, nämlich ein Gleichgewicht zwischen den beiden Isomeren bilden. Es ist das der Fall der sog. Tautomerie. Physikalisch isomere Stoffe liefern vollständig gleichartige Schmelzflüsse, Lösungen oder Dämpfe. Die Eigenschaft physikalischer Isomerie erlischt beim Übergang des kristallinen in den amorphen Zustand, sie ist an den Kristallcharakter gebunden. Daher kann jede Modifikation in der Lösung, der Schmelze oder dem Dampfe der anderen wachsen.

Man erkennt, daß physikalisch isomere Körper nur durch ihre Kristallstruktur unterschieden sind. Natürlich haben ihre Modifikationen verschiedene Stabilität, abgesehen vom Umwandlungspunkte, bei welchem sie gleichrechtlich nebeneinander bestehen. Der metastabilen Art wohnt das Bestreben inne, sich in die stabile zu verwandeln, wie man es an unterkühltem monoklinen Schwefel beobachten kann, der sich freiwillig in die stabile orthotrimetrische Form paramorphosiert. Allerdings vollziehen sich solche Vorgänge zuweilen außerordentlich langsam, selbst beim gegenseitigen Berühren der Arten. Ein hübsches Beispiel dafür ist nach K. Schaum Hexachlorketodihydrobenzol. Kühlt man ein Schmelzpräparat dieses Stoffes an einer Stelle sehr rasch, im übrigen langsam ab, so entsteht dort die stabile Form, in ihrer Umgebung hingegen die metastabile, die bei gewöhnlicher Temperatur neben der anderen bestehen bleibt.

Vielleicht Entsprechendes weist die Natur in Kalkspat und Aragonit auf. Beide sind Calciumkarbonat. Bei der Absonderung dieser Verbindung aus Lösungen ist vielfach Aragonit entstanden, der aber dann im langen Laufe geologischer Zeiten in Kalkspat umgestanden ist. In Schnelle läßt sich die Modifikationsänderung Aragonit  $\rightarrow$  Kalkspat bei etwa  $425^{\circ}$  vollziehen.

Natürlich ist in solchen Fällen der Indifferenz von Modifikationen der physikalischen Isomerie zueinander es auch möglich, daß beide Arten sich gleichzeitig im bunten Gemisch miteinander bilden. Das findet man z. B. nach O. Pauli beim sauren Phenylacridoniumsulfat, von welchem grüne trikline und rote monokline Formen existieren. Die bevorzugte Bildung der einen oder der anderen Art kann man durch den wechselnden Gehalt der Lösung an Wasser, Alkohol und Schwefelsäure beeinflussen.

In mineralogischer Praxis übliche Nachweise des Polymorphismus.

Der Nachweis des Polymorphismus wurde wechselnd mit den Substanzen in mannigfacher Art geführt. Außer den bislang berührten Verhältnissen der Verschiedenheit in der Kristallform bei Identität der prozentischen chemischen Zusammensetzung kommen die Diskontinuitäten in Betracht, die sich in den Eigenschaften der Materie beim Übergang der Modifikationen vollziehen; sie sind z. T. von packender Art, so die Farbenänderung mancher dimorpher Stoffe. Am Jodsilber z. B. wurde durch W. Wernicke (1871) bekannt, daß beim

Erhitzen des Salzes seine Farbe von Gelb in Orange und umgekehrt beim Farbenumschlag. Abkühlen umschlägt. Der Wendepunkt liegt bei  $138^{\circ}$ . O. Lehmann wies nach, daß dabei hexagonale und isometrische Bauarten miteinander wechseln.

Ein hübsches Demonstrationsobjekt für kräftigen Farbenumschlag bei der Modifikationsänderung wurde auch im Quecksilberjodid entdeckt, dessen rote, tetragonale  $\beta$ -Modifikation beim Erwärmen über  $126^{\circ}$  in die gelbe orthotrimetrische  $\alpha$ -Art übergeht. Von Interesse sind dabei Erscheinungen der Unterkühlung; die rückwärtige Wandlung  $\alpha \rightarrow \beta$  verzögert sich; auch bei niedriger Wärme verbleibt dem Salze dann die gelbe Farbe. Indes rückt ein mechanischer Anstoß, etwa das Drücken mit einem Glasstab, die Teilchen alsbald in ihre stabile Lage: der Umschlag von Gelb in Rot tritt ein. Auch bei flüssigen Kristallen ließ sich der Übergang der Modifikationen öfter an Farbenabtönungen erkennen.

In schöner Deutlichkeit zeigt sich die Wandlung der Kristallstruktur beim Veränderung der Polarisationswirkung und Brechung. Übergang einer Modifikation in eine andere oft im polarisierten Lichte. Erhitzt man z. B. eine zwischen gekreuzten Nicols in hellen Interferenzfarben strahlende Borazitplatte, so zieht sich bei  $265^{\circ}$  die Dunkelheit der Isotropie wie ein tief-schwarzer wandernder Schatten über sie hin, das Zeichen des Überganges orthotrimetrisch  $\rightarrow$  isometrisch; beim Sinken der Wärme läuft er wieder zurück. Von Interesse ist es, zu vermerken, daß ein Eisengehalt der Borazite den Umwandlungspunkt erhöht. Beim Quarz ist der Übergang  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  an der Änderung der Zirkularpolarisation und Doppelbrechung, sowie insbesondere deutlich bei der Beobachtung der beiden Spaltbilder erkannt, die ein Prisma entwirft. Um  $575^{\circ}$  springen sie plötzlich in eine andere Lage.

Ein magnetischer Nachweis der Modifikationsänderung wurde mit einfach- Magnetische Veränderungen. sten Hilfsmitteln am Eisen ausgeführt. Es weist drei Modifikationen auf, den  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Ferrit der Metallographen; die Umschlagstemperaturen liegen bei etwa  $800^{\circ}$  und  $900^{\circ}$ . Wie allgemein bekannt, ist  $\alpha$ -Eisen magnetisch; der  $\beta$ - und  $\gamma$ -Art geht dieses Merkmal ab. Erhitzt man also ein Stück reinen Eisens über  $800^{\circ}$ , so folgt es dem Magneten nicht mehr. Von höchstem, auch praktischem Interesse ist es, daß Beimengungen diese Umschlagstemperatur kräftig beeinflussen. In der Tat gelang es, ein Nickeleisen herzustellen, das auch bei gewöhnlichen Wärmegraden unmagnetisch ist und z. B. den Kompaß nicht erregt, ein für den Schiffbau wichtiger Umstand.

Als ein nützliches Instrument für die einschlägige kristallographische Volumänderung. Praxis erwies sich weiter noch das Dilatometer, das aus einer Kapillare und unten anschließendem Behälter zusammengesetzt ist und plötzliche Volumänderungen, wie sie mit den in Rede stehenden Umschlägen in mehr oder minder hohem Grade verbunden sind, anzeigt. Die Probe ruht im Behälter, umgeben von der Flüssigkeit, die sich in die Kapillare fortsetzt. Beim Erhitzen steigt das Fädchen im Haarröhrchen zunächst stetig an; es ändert seinen Stand aber plötzlich beim Umschlage der Probe.

Da die polymorphen Zustände durch wechselnden Wärmeschatz sich Wärmetönung. unterscheiden, läßt sich die Wandlung einer Art in die andere auch an der

begleitenden Wärmetönung erkennen. Sie ist im allgemeinen kräftig genug, daß auf den Abkühlungs- oder Erhitzungskurven sich in festem Zustande polymorph umbauender Substanzen deutliche Knicke auftreten, gerade wie beim Übergang Flüssig  $\rightleftharpoons$  Fest. Bei vielen Studien an künstlichen Salzschnmelzen wurde diese vortreffliche Methode verwertet.

II. Isomorphie. Die Lehre der Isomorphie ist in genialer Abrundung bereits von F. E. Mitscherlich begründet (1819). Vorläufer in der Entdeckungsgeschichte waren J. B. Romé de l'Isle, der die Bildung von gemischten Kristallen aus Lösungen von Kupfer- und Eisensulfat beobachtete, auch N. Fuchs, der, wie man jetzt weiß, mit vollem Recht, bei gewissen Mineralien ein Vikariieren bestimmter Bestandteile annahm. „Die schwefelsaure Tonerde liefert mit Ammonium so gut wie mit Kali, oder mit diesen beiden Alkalien zugleich Alaun. Das Ammonium kann hier die Stelle des Kali ganz oder zum Teil vertreten und umgekehrt.“

Kennzeichen des  
Isomorphismus.

Aber erst F. E. Mitscherlich faßte die ausschlaggebenden Umstände kurzerhand zusammen, indem er als Charakteristikum des Isomorphismus folgende Merkmale aufstellte: Chemische Analogie, gleiche Kristallform und die Fähigkeit der betreffenden Stoffe, zu einheitlichen Gebilden zusammenzukristallisieren.

Die nähere Prüfung dieser Umstände erweist zunächst, daß die chemische Analogie als isomorph hingestellter Stoffe in der Tat zumeist deutlich ist, so bei der Reihe rhomboedrischer Karbonate:  $\text{CaCO}_3$  Kalkspat,  $\text{MgCO}_3$  Magnesit,  $\text{FeCO}_3$  Eisenspat,  $\text{MnCO}_3$  Manganspat,  $\text{ZnCO}_3$  Zinkspat, oder bei der Folge der orthotrimetrischen isomorphen Stoffe  $\text{BaSO}_4$  Schwerspat,  $\text{SrSO}_4$  Coelestin,  $\text{PbSO}_4$  Anglesit. In anderen Fällen ist aber die Analogie doch nicht so ganz glatt ausgeprägt, selbst bei Reihen, die im Hinblick auf Kristallgestalt und Mischkristallbildung für ganz ausgezeichnete Beispiele des Isomorphismus gelten, so bei der Gruppe trikliner Feldspate, deren chemische Verwandtschaftsverhältnisse durch G. Tschermak (1860) unabhängig von seinem lange vergessenen Vorläufer J. F. Ch. Hessel (1826) in einer für immer klassischen Darlegung erörtert wurden; er stellte fest, daß in diesen Mineralien eine fortlaufende chemische Reihe vorliegt, deren Endglieder durch den Albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) und den Anorthit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) vorgestellt werden. Es läßt sich aber nicht verkennen, daß hier chemisch doch wesentlich verschiedene Typen durch das genetische Band des in allen Verhältnissen Zusammenkristallisierens verknüpft sind.

Daß es sich weiterhin bei isomorphen Körpern nicht, wie Mitscherlich anfangs meinte, um gleiche Kristallgestalten, sondern um nur ähnliche Formen handelt, erkannte der Entdecker des Isomorphismus bald selbst. Die Winkel in der Reihe rhomboedrischer Karbonate mögen das hier zeigen. Die Polkante der Spaltgestalt mißt bei Kalkspat  $74^{\circ}55'$ , bei Magnesit  $72^{\circ}38'$ , Eisenspat zeigt  $73^{\circ}0'$ , Manganspat  $72^{\circ}38'$ , Zinkspat  $72^{\circ}20'$ . Und so erhob sich gleich die noch immer unbeantwortete Frage, wie weit Abweichungen der Form bei isomorphen Körpern gehen dürfen.

Hinsichtlich des Zusammenkristallisierens von Stoffen aus gemischten Lösungen haben sich die Ausblicke gleichfalls recht sehr erweitert, insbesondere durch die Darlegungen des großen Forschers in physikalischer Chemie H. W. Bakhuis Roozeboom. Es ist hier der Ort, die Typen der Kristallisationsdiagramme zu mehrern, von denen schon S. 620 die Rede war.

Sie beziehen sich auf Schmelzen und ihre kristalline Erstarrung. Im Vergleich mit den Zuständen im festen Material ist es nicht uninteressant, vorerst auch die Löslichkeit der flüssigen Stoffe ineinander in Betracht zu ziehen. Es tritt dann in außerordentlich vielen Fällen homogene Mischbarkeit in allen Verhältnissen heraus. Von Wichtigkeit ist es, daß aber manchmal bereits im flüssigen Zustande begrenzte oder auch praktisch gar keine molekulare Durchdringbarkeit waltet, und weiterhin, daß diese Fähigkeit wesentlich von der Temperatur abhängt. Beispiel vollkommener Mischbarkeit sind die chemisch analogen Stoffe Wasser und Alkohol, solche für begrenzte Mischbarkeit Äther und Wasser, Blei und Zink, für fehlende Mischbarkeit Eisen und Blei. Bezüglich der natürlichen Vorkommnisse ist es wichtig, daß Silikate sich anscheinend in jedem Verhältnis als Schmelze molekulare durchdringen, während Sulfide und Silikate Schichten übereinander bilden.

Viele Stoffe sind auch im festen Zustande ineinander löslich. Das Diagramm Fig. 52 bezieht sich darauf und erläutert einen Fall völliger Mischbarkeit; es kann nach A. L. Day und E. T. Allen als Typus für die kristallographische Reihe Anorthit — Albit gelten. Eine Schmelze, etwa dem Punkte 1 entsprechend, erkalte (Absinken von 1 auf der Vertikalen); sie fängt bei a an b auszuscheiden, d. h. Mischkristalle (A, B) zu bilden mit vorwaltendem B, dem höher schmelzenden Stoff. Wird die Temperatur der Linie c d erreicht, so sind Schmelze c und Mischkristalle d im Gleichgewicht. Ist also genügend Zeit vorhanden, so werden die b-Kristalle in solche der Zusammensetzung d verändert. Sinkt der Wärmegrad auf e f, so bilden sich f-Kristalle aus denen der d-Art, und da nunmehr Ausscheidungsprodukt und ursprüngliche Schmelze gleich zusammengesetzt sind, hat das Spiel der Pseudomorphosierung des Abgesonderten sein Ende erreicht. Die Schmelze wird fest zu homogenen Kristallen der Zusammensetzung  $f = a$ .

Nicht selten ist die Mischbarkeit im festen Zustande aber begrenzt. Dann kann ein Diagramm nach Art der Fig. 53 die Erstarrung beherrschen. Nach J. H. L. Vogt wird es für die Mischungen von Kalifeldspat und Natronfeldspat gelten. Bei Zusammensetzungen zwischen 100% A und F, z. B. bei Fall 1, ergibt sich gegenüber Fig. 52 nichts Neues, ebensowenig bei solchen zwischen 100% B und G. Schmelzen hingegen, die, wie 2, zwischen F und G fallen, erreichen stets einen eutektischen Punkt E. Der Überschuß über das E entsprechende Normal-

Roozeboomsche Diagramme der Bildung isomorpher Mischungen aus Schmelzen.

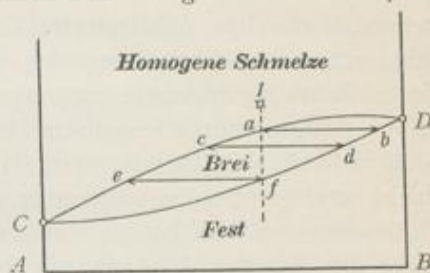


Fig. 52. Diagramm der Bildung von Kristallen mit völliger Mischbarkeit der Endglieder.

gemisch wird beim Erkalten zunächst ausgeschieden: ist A im Übermaß also dieses, ist B im Überschuß natürlich B, jedesmal aber nicht reine Substanz, sondern mit etwas B, bzw. A in molekularer Mengung. Das wird dargestellt durch die eutektische Horizontale F E G; ist deren Temperatur erreicht, so hat

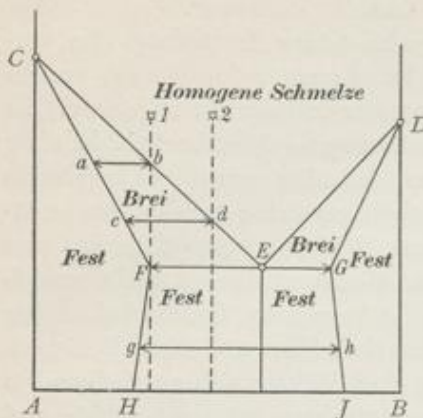


Fig. 53.

Diagramm der Bildung von Kristallen mit teilweiser Mischbarkeit der Endglieder.

wissenschaftlichen Arbeitsstätte G. Tammann's erforscht sind, haben ein überraschendes Ergebnis gehabt, nämlich daß die Fälle der Mischbarkeit im festen Zustande ungemein verbreitet sind, weit mehr, als man, etwas eingeengt durch die gewohnten Fesseln der Isomorphie, glauben möchte. Man weiß nun, daß vielfach weitgehende, feste, innige Durchdringungen auch bei chemisch nicht analogen Stoffen vorhanden sind. In der Hinsicht ist es vielleicht von Interesse, eine Ansicht des Verfassers zu reproduzieren, die er bereits 1894 über die Meinung A. Arzrunis äußerte, welcher die Fälle der Mischbarkeit bei chemisch analogen Stoffen als isomorphe Mischungen von denen der nicht analogen oder morphotropen Mischungen zu sondern vorschlug. „Man wird dabei bedenken müssen, daß man mehr einen formellen als sachlichen Unterschied hierbei macht, und nicht erwarten können, daß die Mischbarkeit sofort aufhört, oder sich wesentlich anders äußert, wenn eine minder vollkommene chemische Analogie zwischen den Endgliedern vorliegt. Nicht allein die chemische Konstitution, sondern auch die physikalische Molekularbeschaffenheit scheint für die Bildung von Mischungsreihen maßgebend zu sein.“

Nach G. Tammann hängt die Mischfähigkeit im festen Zustande auch von der Kristallisationstemperatur insofern ab, als bei höheren Wärmegraden im allgemeinen größere Neigung zur Bildung von Mischungen besteht als bei niederen. Nach ihm ist bestimmender als die chemische Analogie auf die Fähigkeit der Elemente, Mischkristalle zu bilden, die Temperatur der Kristallisation.

Die Folge ist, daß es auch noch im festen Zustande beim Abkühlen zu einem Zerfall der Mischung kommen kann. So weiß man es durch N. S. Kurnakow z. B. für das System Chlorkalium — Chlornatrium; die beiden Salze liefern bei

Zerfall von  
Mischungen im  
festen Zustande.

sich der jeweilige Überschuß vollständig ausgesondert, entweder also in Gestalt von G-Kristallen oder solchen der Zusammensetzung F, je nachdem B oder A gegenüber dem eutektischen Gemisch zuviel vorhanden war. Der Rest teilt sich bei konstanter Temperatur in F- und G-Kristalle auseinander. Hat die Schmelze von Anfang an die Zusammensetzung E, so bleibt sie bis zur Temperatur des eutektischen Punktes völlig flüssig und verfestigt sich erst dann zu F und G.

Die von der Generalidee der Roozeboomschen Diagramme geleiteten Untersuchungen besonders der Metallegierungen, wie sie in reicher Fülle besonders in der

hohen  
Wärm  
ponen

I  
Kris  
lich a  
misch  
krista  
wie si  
der T  
erst e  
die g  
Zweif

I

Bede  
P. G

fester  
mäßig

phisc  
legun

durch  
mitte

usw.  
verhä

deutl  
rung

durch  
gefüll

mitte  
von

Fors

Dat

Stell  
phys

Gew

mitt

Kris  
sie s  
gebe

herv  
k



hohen Temperaturen eine lückenlose Mischungsreihe, beim Erniedrigen des Wärmegrades aber entmischen sie sich, schließlich bis zu den reinen Komponenten.

III. Morphotropie. Der Überblick dieser Verhältnisse ergab für die Kristallographen mehr und mehr die Gewißheit, daß alle drei von Mitscherlich aufgestellten Momente des Isomorphismus, sowohl das Merkmal der chemischen Analogie, als auch das der Formähnlichkeit und des Zusammenkristallisierens, nicht scharf genommen werden können. Die einfache Klarheit, wie sie beim ersten Erkennen der Isomorphie zu herrschen schien, ist also in der Tat nicht mehr vorhanden, sie muß in anderer Auffassung der Tatsachen erst erreicht werden. Daher ist es von Interesse, die Überlegungen zu verfolgen, die gemacht sind, um zur neuen Gruppierung und Deutung der hier ohne Zweifel vorliegenden Gesetzmäßigkeiten zu gelangen.

In der Hinsicht ist die Lehre von der Morphotropie in erster Linie von hoher Bedeutung; es ist nicht zu verkennen, daß durch den Begründer dieser Lehre, P. Groth (1870), die Betrachtungen über Isomorphie auf eine breitere und weit festere Grundlage gestellt wurden. Der genannte Forscher bestimmte planmäßig die Veränderungen, welche chemische Substitutionen im kristallographischen Bau hervorrufen, und zwar betrafen seine Untersuchungen und Überlegungen zunächst das Benzol und die Derivate, welche man von diesem Stoff durch einfache und wiederholte Hydroxylierung, Nitrierung, Amidierung, sowie mittels Austauschs von Wasserstoff durch die Methylgruppe oder durch Chlor usw. gewinnen kann. Unverkennbar hoben sich in der Veränderung des Achsenverhältnisses, ev. auch des Kristallsystems der Glieder solcher Reihen recht deutliche Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und der Änderung des Kristallgebäudes heraus.

Erste Untersuchungen.

Einen noch besseren Ausdruck fanden diese geometrischen Wandlungen durch Anwendung der von F. Becke (1893) und W. Muthmann (1894) eingeführten topischen Achsen. In der Tat, wenn man dies ausgezeichnete Hilfsmittel handhabt und die Ergebnisse mit P. v. Groth in Beziehung setzt zur Lehre von der Kristallstruktur, so scheint es, als öffne sich wohl der Weg, der die Forschung auf diesem wichtigen Felde der Kristallographie vorwärts bringt.

Topische Achsen.

Natürlich erfordert sein Begehen die Kenntnis der kristallographischen Daten zahlreicher Stoffe. Leider mangelt es aber in der Hinsicht noch an vielen Stellen, sei es an goniometrischen Bestimmungen, sei es an der Ermittlung physikalischer Konstanten, insbesondere des hier unentbehrlichen spezifischen Gewichtes.

Die topischen Achsen  $\chi$ ,  $\psi$ ,  $\omega$  eines kristallisierten Körpers lassen sich ermitteln auf Grund der Überlegung, daß die Volumina der Raumeinheiten der Kristallstruktur den Quotienten Molekulargewicht durch Dichte entsprechen; sie seien Äquivalentvolumina ( $V$ ) genannt.  $\chi$ ,  $\psi$ ,  $\omega$  der Elementarkörper ergeben sich durch eine einfache Rechnung.

Drei solche Zahlen  $\chi$ ,  $\psi$ ,  $\omega$  besagen aber nun, wie V. M. Goldschmidt hervorhob, weit mehr als das Achsenverhältnis. In ihm handelt es sich lediglich

um eine Proportion  $a : b : c$ , in der  $b = 1$  gesetzt wird. Im Gegensatz dazu sind  $\chi$ ,  $\psi$  und  $\omega$  bestimmte cm-Größen.

Morphotropische  
Wirkungen.

Mit Hilfe solcher topischen Achsen gelang es, die Änderungen der Kristallstrukturen bei morphotropischen Wandlungen vortrefflich zu überblicken. Einige Beispiele seien nach P. v. Groth angeführt.

$\text{NH}_4\text{J}$	$\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{J}$	$\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{J}$	$\text{N}(\text{C}_3\text{H}_7)_4\text{J}$
$V = 57,51$	108,70	162,91	235,95
Isometrisch	Tetragonal	Tetragonal	orthotrimetrisch
$\chi = 3,860$	5,319	6,648	6,093
$\psi = 3,860$	5,319	6,648	7,851
$\omega = 3,860$	3,842	3,686	4,933.

Die Einführung von  $(\text{CH}_3)_4$  an Stelle von  $\text{H}_4$  des  $\text{NH}_4\text{J}$  hat also das isometrische System in das tetragonale verwandelt;  $\omega$ , entsprechend der Achse  $c$ , hat noch die Dimension der Würfelkante, die horizontalen Dimensionen sind vergrößert. Das zeigt sich fortschreitend auch beim  $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{J}$ , während die Einführung der  $(\text{C}_3\text{H}_7)$ -Gruppen ein ungleiches Auseinanderrücken in den Richtungen hoch, längs und quer des Elementarkörpers, also das orthotrimetrische System bedingt.

Der Eintritt eines Halogenatoms für H bringt gleichfalls oft eine Verringerung der Symmetrie mit sich, während die Nitrogruppe vielfach morphotropisch schwächer als Cl, Br oder J wirkt, ebenso wie die Hydroxylierung. Wichtig ist bei all diesen Deformationen der Umstand, daß ihr Maß außer von der Art der Substitution und der Kristallstruktur noch abhängt von der Größe des chemischen Moleküls, insofern bei kompliziertem Aufbau die morphotropische Kraft des eingeführten Stoffes eine geringere ist als bei einfacheren Verbindungen und daß sie ferner bedingt wird durch die Stellung des ersetzten Wasserstoffs im chemischen Molekül.

Isomorphie als  
isomorphotropie.

Unter diesen großen Gesichtspunkten ließ sich die Isomorphie als Morphotropie mit ähnlich wirkenden Substitutionen auffassen; in der rhomboedrischen isomorphen Reihe von  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ ,  $\text{MnCO}_3$ ,  $\text{ZnCO}_3$  wären Ca, Mg, Fe, Mn, Zn isomorphotrop. Die Änderungen haben ähnliche Größe; der Rahmen des Kristallsystems wird nicht überschritten.

Einfluß der  
Atomgewichte.

Sehr eingehende sorgfältige Untersuchungen stellte in der Hinsicht A. E. H. Tutton an Sulfaten und Selenaten der Alkalien, auch an sulfatischen und chromatischen Doppelsalzen von Alkalien und zweiwertigen Stoffen an. Die Größe der Atomgewichte von K (39), Rb (85), Cs (133) mit dem für Rb fast genau als Mittel der von K und Cs, machte es möglich, das morphotropische Moment des Atomgewichtes zu würdigen. Es ergab sich das höchst interessante Verhältnis, daß bei den erwähnten Stoffen die Veränderung der topischen Achsen mit dem Atomgewicht meist Parallele hält.

Entropie.

Auch G. Linck und seine Schüler haben sich in zahlreichen Studien der einschlägigen wichtigen Fragen angenommen. Für die im Zusammenhang mit dem Atomgewicht stehende reihenweise, gesetzmäßige Änderung der kristallo-

graphischen Eigenschaften prägte G. Linck den Namen katamere Eutropie oder Eutropie kurzweg.

Zwar machte F. M. Jäger bei der Besprechung der Tuttonschen Studien darauf aufmerksam, daß ein weiterer Ausblick, eine Übersicht nämlich über alle bezüglich der Salze von Kalium, Rubidium, Caesium bekannten kristallographischen Daten, zeigt, wieviel komplizierter das Problem liegt, als es nach den Ergebnissen an einigen Gruppen zu sein scheint. Indes muß man mit A. E. H. Tutton eben bedenken, daß es der Polymorphismus ist, der die Komplikation in das Thema hineinbringt. Es kommt darauf an, unter den Modifikationen die zusammengehörigen zum Vergleich herauszufinden. Sehr lehrreich sind in der Hinsicht die Erfahrungen über sogenannten Isodimorphismus.

IV. Isodimorphismus. Der Ausdruck besagt, daß zwei Stoffe in je zwei Modifikationen bestehen, die paarweise isomorph sind. Oft ist dabei eine der beiden Gleichgewichtslagen einer Substanz oder je eine von zweien nur in isomorpher Mischung mit dem andern Stoff, nicht frei für sich, bekannt. Das trifft z. B. beim Bittersalz  $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$  und dem Eisenvitriol  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$  zu. Die Mischkristalle des Magnesiumsulfats mit einem Gehalt bis 19% Eisensalz sind orthotrimetrisch, andererseits gibt es monokline Mischungen des Eisensulfats mit Magnesiumsalz bis zu 54% des letzteren. Von 54—81% Bittersalz erstreckt sich eine Mischungslücke. Daraus ist zu erschließen, daß beide Salze dimorph und paarweise isomorph sind.

Höchst mannigfaltige Reihen isopolymorpher Art wurden durch A. Ries an den Chloro- und Bromoplatinaten sowie -stannaten der quaternären Ammoniumbasen bekannt. Nach seinen Untersuchungen ist anzunehmen, daß alle Salze, welche sich vom Platinsalmiak  $NH_4ClPtCl_4$  durch Substitution von H des  $NH_4$  durch Alkyl ableiten, in nicht weniger als sechs regulären und sechs zugehörigen pseudoregulären Modifikationen möglich sind, deren Existenzgebiete gewisse Intervalle der Temperatur begreifen. Bei den verschiedenen Salzen fallen die sich entsprechenden Modifikationen natürlich nicht in dieselben Wärmegradbereiche, vielmehr findet in der Hinsicht eine gesetzmäßige Verschiebung statt. Die wichtige Folgerung ist, daß man alle Vergleiche von isomorphen Stoffen, z. B. bezüglich der topischen Achsen, der Optik und anderer kristallischer Eigenschaften, nicht bei gleichen, sondern korrespondierenden Temperaturen machen sollte. Wie V. M. Goldschmidt hervorhebt, ist es in der Hinsicht eine bedeutsame Aufgabe der Kristallographie, umfassende Untersuchungen bei möglichst niedriger Temperatur, also gewissermaßen an thermisch fast ruhender Materie zu machen. Nach W. Nernst nimmt ja die spezifische Wärme fester Körper bei sehr tiefen Temperaturen außerordentlich stark ab. Die Eigenschaften des Kristallgebäudes werden dann also nur wenig durch Wärmebewegungen berührt.

V. Eigenschaften der Mischkristalle. Von größter Wichtigkeit bei den Bemühungen, die Verhältnisse des Isomorphismus zu klären, war und ist die Frage nach den Eigenschaften der Mischkristalle. Die Meinung, daß alle physikalischen Umstände von einem zum andern Endgliede rein additiv ver-

Isopolymorphismus.

Vergleichbare Temperaturbereiche.

Wichtigkeit kristallographischer Bestimmungen bei niedrigster Temperatur.

laufen, ist von vornherein nicht wahrscheinlich und wurde auch von der Erfahrung widerlegt. Sie zeigt z. B. daß Erstarrungskurven von gemischten Kristallen z. T. ein ausgeprägtes Minimum besitzen. Andererseits fand man Maxima in isomorphen Reihen bezüglich der Härte von Metallegierungen und wiederum Minima hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit. Bezüglich der Gestalt hat man verschiedentlich die Mischkristalle zwischen den Formen der Endglieder befunden, so bei den Plagioklasen, bei anderen aber wieder nicht. Eine Gleichmäßigkeit in der Hinsicht ist auch gar nicht zu erwarten. Allgemein gedacht wird man mit P. v. Groth die durch Beimischung entstandene Formänderung als eine homogene Deformation auffassen, ähnlich wie sie sich beim Erhitzen vollzieht. Der Vergleich mit quellbaren Kristallen (S. 545) liegt dabei gleichfalls nahe. Bezüglich der optischen Verhältnisse isomorpher Mischungen ist der gesetzmäßige allmähliche Übergang der Eigenschaften von einem Endgliede zum anderen verschiedentlich in prächtiger Weise dokumentiert und zu einem ausgezeichneten Hilfsmittel der Diagnose geworden. So spielt bei der Bestimmung der Mischfeldspate in der Reihe vom Albit zum Anorthit der Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und Optik, insbesondere der Lage der Auslöschungsrichtungen eine bedeutende Rolle. In der nachstehenden Tabelle ist die Verknüpfung beider Eigenschaften nach dem Vorgange von Max Schuster (1879) versinnbildlicht, der mit bewunderungswürdiger Genauigkeit diese grundlegend wichtigen Umstände klarlegte.

Mischung	Auslöschungsschiefe	Auslöschungsschiefe
	zur Achse a auf c (Fig. 9 S. 559)	zur Achse a auf b (Fig. 9 S. 559)
Albit	+ 4°30'	+ 19°
Oligoklas	bis — 0°35'	bis — 2°15'
Andesin	„ — 2°58'	„ — 10°26'
Labrador	„ — 12°28'	„ — 26°
Bytownit	„ — 36°36'	„ — 35°30'
Anorthit	— 37°	— 36°

Das schöne allgemeine Ergebnis der Untersuchungen M. Schusters war, „daß die Kalknatronfeldspate auch in optischer Beziehung eine analoge Reihe bilden wie nach allen ihren übrigen Eigenschaften, und daß jedem bestimmten Mischungsverhältnisse der Grenzglie der auch ein bestimmtes optisches Verhalten zu entsprechen scheint“.

In gleicher Hinsicht verwertet man den Wandel der Brechungsexponenten von Feldspatmischlingen. Auch darüber mag eine Tabelle Aufschluß geben.

	Anorthitgehalt in Molekularprozenten	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
		Albit	0	1,529
Oligoklas-Albit	13	1,534	1,538	1,543
Oligoklas	22,5	1,540	1,544	1,547
Labrador	50	1,555	1,558	1,563
Anorthit	100	1,575	1,583	1,588

Weiterhin wurde die Größe des Winkels der optischen Achsen, die ja von dem Verhältnis der Brechungsexponenten abhängt, als ein guter Anhalt für die chemische Natur von Mischungen erkannt. Während z. B. bei Enstatit ( $\text{MgSiO}_3$ ) Achse c erste Mittellinie ist, findet man beim Hypersthen ( $\text{FeSiO}_3$ ) die optischen Achsen derart verlegt, daß a ihren spitzen Winkel hälftet. Die stofflichen Mittelglieder sind auch in optischer Hinsicht Übergänge. Beim Olivin haben verschiedene Forscher eine ähnliche Verknüpfung chemischer und optischer Umstände erkannt, und bei den Plagioklasen hat man gelernt, die wechselnde konoskopische Interferenzfigur auf den kennzeichnenden Schnitten bestens zur Ermittlung der Feldspatart auszunutzen.

VI. Isotypie. Zum Beschluß all dieser Überlegungen über die Verknüpfung des stofflichen und geometrischen wie physikalischen Wesens kristalliner Materie möge noch einer Betrachtung Raum gegeben werden, die von besonderer Seite aus ein Licht auf die gestaltliche Art der Kristalle wirft.

Eine Durchmusterung der Kristalle nach der Häufigkeit der von ihnen zur Schau gebrachten Kristallsysteme hatte Buys, Ballot gezeigt, daß bei chemisch einfach zusammengesetzten Körpern, also ein-, zwei- und dreiatomigen Substanzen, das isometrische und das hexagonale System bevorzugt sind. Nicht zu verkennen ist nach der Meinung des Verfassers weiterhin, daß sich innerhalb der hexagonalen Gruppe chemisch einfach aufgebauter Stoffe, bei der ja im Gegensatz zur winkelstarrten isometrischen Abteilung die Möglichkeit des Wechsels der Flächenneigung gegeben ist, drei und zwar nur drei bestimmte Typen der Kristallform geltend machen, unabhängig von der chemischen Natur der Stoffe. Architektonisch gedacht erscheinen somit isometrische und hexagonale Bauweise und innerhalb der letzteren drei Anordnungen der Teilchen besonders stabil zu sein. Dabei ist es charakteristisch, daß die drei Typen des hexagonalen Baus unter sich und zum isometrischen Typus in sehr einfacher Beziehung stehen.

Daß diese Verhältnisse, welche ganze Serien von Stoffen beherrschen, „zufällig“ seien, wäre eine unbefriedigende Deutung, vielmehr liegen hier wohl Fingerzeige dafür vor, daß außer den bekannten Gesetzen der Morphotropie und Isomorphie noch eine andere Bauregel in der kristallographischen Welt Gültigkeit hat, wie es scheint, das Gesetz der größten geometrischen Stabilität.

#### Schlußwort.

Am Ziele der Wanderung im anorganischen Reiche angelangt, die der Verfasser in Gemeinschaft mit den Lesern dieses Werkes unternahm, ist beim Abschiednehmen voneinander ein Überblick der Fahrt gewiß am Platze.

Es galt einem Gegenstande der Forschung, der das Hauptmaterial im Bau unserer Erde ausmacht, aber dennoch außerhalb des Kreises der Naturwissenschaftler nicht sehr vielen auch nur in den breitesten grundlegenden Umständen bekannt ist. Und so erklärt es sich, daß im Anblick der Fülle der für den Leser

neuen Erscheinungen nicht daran gedacht werden konnte, tiefgründig studierend in die Mineralwelt einzudringen. Vielmehr war die Tendenz der gemeinsamen Betrachtungen lediglich die, einerseits die großen Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge herauszuheben, welche im anorganischen Reiche hinsichtlich der Gestalt, des physikalisch-chemischen Wesens und der Entstehung seiner Glieder erkundet worden sind, anderseits das geistige und physische Rüstzeug zu schildern, das den Forschern auf dem in Rede stehenden großen Felde der Naturerkenntnis so manch frohes Gelingen ihrer Untersuchungen ermöglicht hat.

Zuweilen mußten für den naturwissenschaftlich nicht eingeschulten Leser ungewöhnliche Anforderungen an das Vorstellungsvermögen erhoben werden; aber die kleinen Mühen, der Hoffnung gibt sich der Verfasser hin, verschwinden beim Gedenken des besonderen durch sie erschlossenen Reizes unserer Disziplin, die nicht nur den wissenschaftlichen Sinn durch einfache mathematische Faßlichkeit und Klarheit der Erkenntnis befriedigt, sondern zugleich das künstlerische Gemüt erfreut.

Vielleicht hegt der eine oder andere den Wunsch, näheres zu erfahren. Da sei denn zunächst auf eine Reihe deutscher Lehrbücher verwiesen, die den Interessierten weiterführen können. Auch möge eine Anzahl referierender und Originaluntersuchungen bringender deutscher Zeitschriften genannt werden, die dafür sorgen, daß die Fortschritte unserer Wissenschaft baldmöglichst vielen zu Gute kommen. Eine scharfe Trennung zwischen Mineralogie und Gesteinskunde sei auch hier nicht gemacht in der Erkenntnis, daß Petrographie mit Mineralogie auf das Engste zusammenhängt, insofern die Gesteinskunde die Kenntnis der Mineralaggregate bringt, die in geologisch bedeutsamen Massen die steinerne Erdkruste aufbauen.

#### Deutsche Lehrbücher der Mineralogie und Petrographie.

- M. BAUER, Lehrbuch der Mineralogie.  
H. BAUMHAUER, Lehrbuch der Mineralogie.  
R. BECK, Lehre von den Erzlagerstätten.  
A. BERGEAT, Erzlagerstätten.  
F. BEYNSCHLAG, P. KRUSCH und J. H. L. VOGT, Die Lagerstätten der nutzbaren Mineralien und Gesteine.  
R. BRAUNS, Das Mineralreich.  
R. BRAUNS, Chemische Mineralogie.  
W. BRUHNS, Elemente der Kristallographie.  
C. DOELTER, Physikalisch-chemische Mineralogie.  
P. v. GROTH, Physikalische Kristallographie.  
P. v. GROTH, Chemische Kristallographie, 1. Teil.  
G. GÜRICH, Das Mineralreich.  
E. KAISER, Min.-petrogr. Untersuchungsmethoden.  
TH. LIEBISCH, Geometrische Kristallographie.  
TH. LIEBISCH, Physikalische Kristallographie.  
G. LINCK, Grundriß der Kristallographie.  
NAUMANN-ZIRKEL, Elemente der Mineralogie.  
K. OEBBEKE und E. WEINSCHENK, Lehrbuch der Mineralogie.  
R. REINISCH, Petrographisches Praktikum.  
F. RINNE, Elementare Anleitung zu kristallographisch-optischen Untersuchungen.  
F. RINNE, Praktische Gesteinskunde.  
H. ROSENBUSCH, Elemente der Gesteinskunde.  
ROSENBUSCH-WÜLFING, Mikroskopische Physiographie der Mineralien und Gesteine.  
G. v. TSCHERMAK, Lehrbuch der Mineralogie.  
E. WEINSCHENK, Gesteinsbildende Mineralien und Grundzüge der Gesteinskunde.  
F. ZIRKEL, Lehrbuch der Petrographie.

Ein Handbuch der systematischen Mineralogie besitzt die deutsche Literatur in dem Werke von C. HINTZE.

Ein großes Werk über Mineralchemie wird von C. DOELTER herausgegeben.

#### Deutsche Zeitschriften für Mineralogie und Petrographie.

- GROTHS Zeitschrift für Kristallographie und Mineralogie.  
Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie.  
TSCHERMAKS Mineralogische und petrographische Mitteilungen.  
Fortschritte der Mineralogie.