Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 12 (1955)

Artikel: Werden und Vergehn in der Kristallwelt
Autor: Huttenlocher, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-319638

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

H. HUTTENLOCHER †

Werden und Vergehen in der Kristallwelt

Über dieses Thema hatte Prof. Huttenlocher auf den 15. Dezember 1954 einen Vortrag im Zyklus der kulturhistorischen Vorlesungen angesagt, als er kurz vorher durch den Tod abberufen wurde. Für die freundliche Überlassung des Manuskriptes sind wir Frau Prof. Huttenlocher zu Dank verpflichtet.

Am heutigen Abend unserer kulturhistorischen Vorlesung sollen unsere Gedanken den Kristallen, Mineralien und Gesteinen, also der anorganischen Umwelt des Menschen zugekehrt sein. Ob wir den Kristall heute noch mit derselben Resigniertheit und bedrückenden Melancholie betrachten, wie seinerzeit unser Albrecht Dürer, wird am Ende unserer Stunde zu beantworten sein. Während vielen Wochen war ich im Treppenhaus des Naturhistorischen Museums hinter einer spanischen Wand mit der Aufstellung eines Objektes beschäftigt und habe dort nur allzu oft die Äußerunggen der heraufsteigenden Museumsbesucher gehört: «Kommt, kehren wir um, hier sind ja nur Steine und Kristalle.» Dies wenig schmeichelhafte Urteil sitzt leider tiefer als eine flüchtige Erwähnung vermuten läßt. Etwas davon haftet selbst in naturwissenschaftlich nicht uninteressierten Kreisen. Wie könnte es denn auch geschehen, daß man in dem erst vor wenigen Jahren in Kraft getretenen Studien- und Prüfungsreglement für naturwissenschaftliche Gymnasiallehrer die Mineralogie praktisch verdrängte. Es ist tatsächlich zu wenig Allgemeingut, was die moderne Mineralogie ist und leistet, daß sie in weite Gebiete unserer heutigen naturwissenschaftlichen Erkenntnis hinein verankert ist und geradezu eine zentrale Stellung eingenommen hat und zu einer Kittstelle geworden ist; es ist auch zu wenig allgemein bekannt, daß nicht nur das Reich der Gesteine und Mineralien, sondern die gesamte «tote Welt», mit eingeschlossen alle die vielen künstlichen Stoffe, deren wir uns so umfangreich bedienen, in gleicher Weise durch Natur und Wesen des Kristalls regiert werden. Es empfiehlt sich deshalb eine kurze historische Revue dieser Entwicklung.

Unter GEORG AGRICOLA (1553) nahm die Mineralogie bereits eine zentrale Stellung ein. Nach dem kulturellen Niedergang während der Religionswirren und dem Dreißigjährigen Krieg setzte, durch PARACELSUS' «Codex naturae» zum scharfen Beobachten der Tatsachen angeregt, mit NICOL. STENOS Schrift 1669 die Weiterentwicklung wieder ein. Mit dieser Schrift wurde die Kristallographie begründet, denn nach ihr bleiben bei noch so vielgestaltiger Form des Bergkristalls die an ihr gemessenen Winkel zwischen entsprechenden Flächen gleich (Gesetz der Winkel-Konstanz). Die Schrift ist in doppelter Hinsicht wertvoll, einmal weil hier die Bedeutung einer Untersuchungsmethode, unabhängig von überlieferten Lehrmeinungen (Gegensatz zu den Scholastikern) zur Geltung kommt, dann aber weil für die Mineralogie das Prinzip der Richtungsabhängigkeit im festen Stoff festgelegt wird. Dieses Grundproblem erhält eine weitere Stütze in der Entdeckung der Doppelbrechung durch BARTHOLINUS (1669) mit der sich dann eingehender HUYGENS und NEWTON abgaben. Es folgten die für die ganze Kristallphysik wichtigen Entdeckungen der Polarisation des Lichtes und seiner Transversalwellennatur (Malus), die Studien über die Lichtausbreitung in Kristallen von BIOT, BREWSTER und FRESNEL, die Konstruktion des Kalkspatpolarisators durch den Schotten NICOL. Der Nicol'sche Polarisator konnte in das schon 100 Jahre früher von LEEUWENHOOK eingeführte Mikroskop eingebaut werden, wodurch dem Mineralogen nicht nur ein Instrument zur Vergrößerung, sondern ein noch viel wertvolleres zur quantitativen Messung der optischen Anisotropieeffekte zur Verfügung stand.

Mit der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts war das Gebäude der Kristalloptik und auch weitgehend der Kristallphysik abgeschlossen, und es entwickelte sich die Mineralogie von da an immer deutlicher nach zwei voneinander mehr oder weniger unabhängigen Richtungen. Die eine, vorwiegend kristallkundlich ausgerichtet, versuchte die formalen und physikalischen Erscheinungen zu erforschen und begann auch schon Vorstellungen über die Struktur und Anordnung der Bausteine zu entwickeln (HAÜY, BRAVAIS, WEISS, SOHNCKE, SCHÖNFLIESS), welchem Ziel wohl die Forschernatur PAUL v. GROTH (1927) am nächsten kam. Die andere Richtung verfolgte mehr mineralkundliche Ziele und stellte Fragen über die stofflich-chemische Natur und solche der Mineralsystematik in den Vordergrund; dies erfolgte unter dem Einfluß der Entwicklung der analytischen Chemie (KLAPROTH, SCHEELE, MITSCHERLICH, BREITHAUPT, WERNER). Die zunehmende Kenntnis von der chemischen Natur der Minera-

lien und die Weiterentwicklung der Polarisationsmikroskopie, die das Gestein, nachdem es bis 1/200 mm dünngeschliffen ist, im durchfallenden polarisierten Licht zu untersuchen gestattet, brachte der Mineralogie und Petrographie einen gewaltigen Aufschwung (SORBY, ZIRKEL, ROSENBUSCH). Kein Wunder, wenn sich bis zu Anfang unseres Jahrhunderts eine Unsumme von Untersuchungsdaten ansammelte, die vorwiegend zu systematischer Klärung ausgewertet wurden, aber auf weitere, nicht eigentlich zum Fach gehörige Kreise wenig Anziehung auszuüben vermochten. Mit der Jahrhundertwende setzte jedoch auf der ganzen Linie eine ungeahnte Entwicklung mit vollständiger Neuorientierung ein: Zwei Dinge müssen hier hervorgehoben werden.

Zunächst war es ein Mineral, welches die Welt des neuen Jahrhunderts revolutionierte: Die reichen Silbergruben von Joachimsthal (danach das Wort «Thaler» und abgewandelt «Dollar» gebildet) förderten gleichzeitig ein damals der Verhüttung schwer zugängliches Erz, «ein Blendwerk des Teufels» nach der Ausdrucksweise der dortigen Bergleute, das auf die Halde geworfen wurde. In ihm entdeckte 1789 KLAPROTH das neue Element Uran; es erhielt den Namen «Uranpechblende», an welchem BECQUEREL merkwürdige Strahlungserscheinungen feststellte; der rätselhafte Strahler dieser Uranverbindung wurde 1898 durch das Ehepaar CURIE im darin enthaltenen Radium erkannt. Damit hatte man erfahren, daß die Atome bei gleichzeitiger Umwandlung in neue Elemente zerfallen und der bisher existierende Begriff «Atom» geändert werden muß. Die dadurch in Fluß gekommenen Forschungen lassen immer deutlicher erkennen, wie atomphysikalische Vorgänge den Energiehaushalt unserer Erde und des Weltalls beeinflussen, umgestaltend auf die Erde einwirken und die Verteilung der Elemente bestimmen. Immer deutlicher wird es, wie mit der Evolution der wissenschaftlichen Forschung die anorganische «tote Welt» bis ins kleinste hinein eigenen Evolutionen unterworfen ist.

Als zweiter Partner in der Neuorientierung unseres Jahrhunderts haben die Röntgenstrahlen zu gelten. Mit dem v. LAUE'SCHEN Versuche 1912 (München, wo auch GROTH wirkte), wonach die kurzwelligen Röntgenstrahlen am bis jetzt vermuteten gesetzmäßigen Anordnungsgitter der Kristallbausteine zur Abbeugung gelangten, bestätigte sich erstmalig der diskontinuierliche Gitteraufbau der festen Materie. Dieser weist in gleichen Richtungen gleiche, in verschiedenen im allgemeinen verschiedene oder in bestimmten, symmetrisch gelegenen auch wieder gleiche Teilchenabstände auf, je nach Symmetriegrad des Kristalls.

Daraus resultiert das schon erwähnte richtungsabhängige Verhalten, die Anisotropie des Festkörpers, seine Feinstruktur.

Seit 1912 hat sich die Kristallstrukturforschung zu einer weit ausgebauten, selbständigen, fundamental wichtigen, unsere erste Jahrhunderthälfte geradezu kennzeichnenden Wissenschaft ausgewachsen. Sie hat die alte sogenannte klassische Kristallographie zu einem viel umfassenderen Wissensgebiet umgewandelt und der heutigen Kristallographie eine über die eigentliche Mineralogie hinaus in andere naturwissenschaftliche Disziplinen und besonders weit in die technischen Gebiete hineinreichende Bedeutung verschafft. Ihre Ergebnisse sind zum Ausgangspunkt für das Verständnis des physikalisch-chemischen Verhaltens des Festkörpers geworden. Die höchst umfangreichen Ergebnisse kristallstruktureller Forschung lassen sich heute in einer Kristallchemie zusammenfassen, in welcher die Gesetzmäßigkeiten des Kristallbaues in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung, sowie den individuellen Eigenschaften der Kristallbausteine zum Ausdruck kommen.

An einfachen, natürlich auftretenden, anorganischen Verbindungen konnte V. M. GOLDSCHMIDT die Grundgesetze der Kristallchemie ableiten, nach welchen weitgehend die Raumbeanspruchung der einzelnen Ionen, deren Wirkungsradien für die Anordnung im Gitter, für die Koordinationszahl (= Zahl der nächsten Nachbarn) als bestimmend anzusehen ist. Damit löst man sich vom bisher herrschenden Molekülbegriff, welcher den Strukturvorstellungen organischer Verbindungen entstammte. Höchst wertvoll ist die Erkenntnis von der gegenseitigen Ersetzbarkeit verschiedenwertiger Elemente, was die chemische Variabilität der Kristallverbindungen so bedeutsam charakterisiert.

Die enge Beziehung zwischen Mineralchemie und Kristallchemie führte zwangsläufig bei zusammenfassenderer Betrachtung zur Geochemie, welcher Ausdruck schon 1838 vom Basler Chemiker SCHÖNBEIN geprägt worden, inzwischen aber wieder in Vergessenheit geraten war. Sie erstrebt nicht nur die Erforschung der quantitativen chemischen Zusammensetzung unseres Planeten und seiner Einzelteile, sondern vor allem die Klärung der Verteilungsweise der einzelnen Elemente auf die verschiedenen Mineralien und Gesteine. Von den russischen Geochemikern VERNADSKY und FERSMAN wird vor allem Wert auf die Migration der Atome, also auf das Bewegungsbild jedes Atoms in Raum und Zeit gelegt. Die verfeinerten Methoden der letzten Zeit, Mikroanalyse, optische und Quarzspektroskopie, Röntgenspektroskopie, Fluoreszenzspektroskopie, Isotopenchemie, lassen auch die Spu-

renelemente erfassen, die für geochemische und wirtschaftliche Probleme wichtige Aussagen machen können.

Jeder mineral- und gesteinsbildende Prozeß auf der Erde birgt zwei Probleme zugleich in sich, ein kristallchemisches und ein geochemisches; beide sind im Kristall verankert; die Vorgänge in der unbelebten toten Welt sind ohne die Mitwirkung des Kristalls ebenso wenig denkbar wie das Leben der organischen Welt ohne Zelle.

Im Laufe des 19. Jahrhunderts wurde von der Chemie ein fast unübersehbares Tatsachenmaterial angehäuft, das nach einer Sichtung von höheren Gesichtspunkten drängte; es war dies die physikalische Chemie mit ihren Hauptsätzen der Thermodynamik, der Gleichgewichts- und Phasenlehre, die nun auch mächtig auf die Mineral- und Gesteinsforschung einwirkte. Die enorm vielgestaltigen Vorgänge auf der Erdoberfläche oder in deren Tiefe erhalten eine begründende Erklärung, es werden die Richtungsverläufe der Reaktionen in ihrer Abhängigkeit von der geologischen Situation mit bestimmten Druck-, Temperatur- und Konzentrations-Bedingungen ersichtlich, und damit kann auch die Genetik auf sichere Grundlage gestellt werden. Mit diesen stürmisch voraneilenden Forschungen setzte auch schon die physikal-chemisch dirigierte Mineralsynthese ein und drohte die Gefahr sich auszubreiten, die Naturbeobachtung zu vernachlässigen, die stets unser letzter entscheidender Prüfstein für die Richtigkeit unserer Ableitungen und Ansichten bleiben muß.

Ein weiteres wissenschaftlich ebenso interessantes wie praktisch kulturell wichtiges Teilgebiet ist die Lagerstättenlehre. Wissenschaftlich sind Lagerstätten deshalb bedeutsam, weil hier einzelne Elemente eine gegenüber ihren durchschnitttlichen Verteilungsgraden außergewöhnliche Anreicherung aufweisen, welche gegebenenfalls eine kulturell-wirtschaftliche Nutzbarmachung gestatten. Nach der modernen Lagerstättenkunde verdanken aber solche Konzentrationen ihre Entstehung nicht außerordentlichen Umständen, sondern sind Produkte gesetzmäßig und zielstrebig ablaufender und überblickbarer Entwicklungen.

Die Lagerstättenuntersuchung erfordert breitestes Studium von großräumigen geologischen Beobachtungen im Felde bis zu minutiösesten mikroskopischen und chemischen Forschungen im Labor; für die Untersuchung der undurchsichtigen Erze leistet die nach dem Ersten Weltkriege entwickelte Auflichtmikroskopie an polierten Schliffen eine wertvolle Hilfe.

Nachdem Sie einen Überblick über die in den letzten 50 Jahren entstandenen Teilgebiete mineralogisch-petrographischer Forschung erhalten haben, möchten Sie vielleicht doch mit einigen konkreten Ergebnissen bekannt werden. Ich lade Sie deshalb ein, mit mir einen Gang durch die verschiedenen Laborräume unserer Erde zu machen, um hier einige Eindrücke vom Werden und Vergehen der Kristalle der festen Bausteine der anorganischen Welt unter den verschiedensten Bedingungen zu gewinnen.

Zunächst stellt schon die Erde selbst als Ganzes ein eigenes physikochemisches System dar, in welchem unter Einfluß der Rotationssysteme aus dem ursprünglichen einheitlichen Nebel kondensierter Brocken- und Tröpfchenteilchen sich Aussonderungen entwickelten. Durch die Aggregierungen und Kondensierungen wurden Bewegungs- und Gravitationsenergie frei, es entstand Wärme, die zusammen mit der aus der Kernenergie der radioaktiven Stoffe stammenden Wärme zu Aufschmelzungen und zu weiterer gravitativer Sonderung führte. Die Erde und die Planeten sind demnach kalt entstanden, die Erde hat nie ein selbstleuchtendes Fixsternstadium durchgemacht; sie hat ihre Wärme später erworben.

Die dadurch geförderte gravitative Sonderung führte zu einer nach physiko-chemischen Gesetzen geregelten Verteilung der Elemente, zu Schalenbau, zu Differenzierung, zu Geosphären.

Die Erklärung der geosphärischen Gliederung wird weiter durch die Meteoritenkunde, die Geophysik, die Seismik, die Magmenlehre, die Metallurgie usw. gestützt. Weitgehend ist die mengenmäßige Verteilung der Elemente auf die verschiedenen Geosphären durch den Bau der Atomkerne diktiert (schwere innen, leichte außen). Die weitere Verteilungsweise einer gegebenen Menge eines Elementes dagegen ist vom Charakter seiner Elektronenhülle abhängig. Beide Verteilungsweisen spiegeln sich in der Stellung im periodischen System wieder.

Als geosphärische Charaktere werden siderophil, chalkophil, atmophil und biophil auseinandergehalten. Siderophil bedeutet das Bestreben sich mit metallischem Eisen zu binden (Ni-Fe-Kern, Meteoriten), chalkophil sich sulfidisch zu binden (Sulfidanteil der Meteoriten und kieselsäurearmer Magmen), lithophil charakterisiert die am Aufbau der äußern Erdkruste silikatisch oder karbonatisch sich beteiligenden Elemente, atmophil sind die Elemente der die Erde umgebenden Atmosphäre und biophil schließlich verhalten sich die Elemente, die den Lebenskreislauf der Organismen passieren. — Im irdischen Planetkör-

per herrschen Elemente, die schwerer als O sind, vor und trennen sich gravitativ und in Abhängigkeit von Bindungsenergien insbesondere gegenüber den wichtigsten Anionen O und S. Dies hat weiter zur Folge,, daß zum Beispiel U trotz hoher Dichte und hohem spezifischem Gewicht nicht im Kern, sondern wegen der großen Bindungsenergie zu O in den äußeren Zonen angereichert wird. Die Erde bildet so mit den nach außen abnehmenden Drucken und Temperaturen und dem gleichzeitig nach außen zunehmenden Oxydationspotential ein in dieser Richtung zunehmend ionisiertes System. Die für die Silikatrinde charakteristischen lithophilen Atome Si, Al, O, Mg, Ca Na, K zeichnen sich baulich dadurch aus, daß unter ihrer äußersten Valenzelektronenschale die Rumpfelektronenschalen mit stabilen 8er = Oktett-Konfigurationen folgen. Das gestattet ein leichtes Abreißen der Valenzelektronen und Aufnahme durch den häufig auftretenden, niedrige Ordnungszahl und niedriges Atomgewicht aufweisenden und ähnlich gebauten Sauerstoff. Im Gegensatz dazu sind die siderophilen Elemente der tiefsten Erdkernzonen mit ihren Nickeleisenphasen dadurch charakterisiert, daß die Valenzelektronenschalen so viele Elektronen aufweisen als den unmittelbar darunter folgenden Rumpfschalen fehlen. Durch die hohen im Innern herrschenden Drucke verwischen sich die Unterschiede zwischen Valenz- und Rumpfelektronen, die Valenzelektronen werden in die Rumpfelektronen hineingeschoben, wodurch die siderophilen Elemente ihre Fähigkeit zu ionisieren verlieren und weiter das Innere des Planeten zur Bildung spezifischer Metallphasen befähigt wird.

Nach den thermodynamischen Behandlungen der Ionisationsstufen durch Barth und Ramberg kann ein durch geologische Umwälzungen in die Tiefe versetzter Gesteinskomplex nur den der betreffenden Tiefe angepaßten O-Gehalt besitzen; der aus der höhern Zone mitgebrachte O-Überschuß muß daher nach oben migrieren. Mit der O-Abnahme nach unten sinkt auch die Ionisationsstufe, das Fe''' geht über in Fe'', zunehmender Tiefendruck bedeutet festere Elektronenbindung durch die Kationen, wodurch eine entsprechende Menge O, Wasser und Kohlensäure frei wird.

Soviel über einige wenige wichtige Charakterzüge aus dem Laboratoriumsgeschehen unserer Gesamterde. Der Erde stehen aber noch weitere auf spezielle Verhältnisse zugeschnittene Laboratorien zur Verfügung. So ist die Erdkruste, jene nur 16—20 km dicke äußerste Schale des 1200 km messenden lithosphärischen Erdmantels (bei einem Erdradius von 6400 km), wirklich auch nur mit einer Hühnereischale vergleichbar,

der Schauplatz der Gebirgsbildungen, des Vulkanismus, des Plutonismus und des Lebens, die von uns bald direkt, bald indirekt überblickt werden können. In größeren Tiefen, besonders von 40 km einwärts sind schon Zustände möglich, die nicht ohne weiteres mit unsern üblichen zu vergleichen sind; auf jeden Fall aber ist keine zirkumzonale Magmenschicht anzunehmen; denn Magmen sind relativ erdoberflächennahe zeitlich und räumlich beschränkte Zustände. Die Kruste ist Schauplatz von zwei verschieden ablaufenden Stoffwechselprozessen, einmal der endogenen, innern, die sich entweder direkt aus Magmen ableiten lassen oder durch Druck-Temperatur-Veränderungen der Kruste selbst ausgelöst werden, sodann der äußern, die unter Mitwirkung der Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre ablaufen, die jeweils in drei Sonderlaboratorien mit eigenen Arbeitsmitteln und -weisen sich vollziehen.

Von den endogenen Werdeprozessen seien zunächst diejenigen betrachtet, die vom Gesteinsfluß, vom Magma, über die Erstarrung in der Tiefe zum Plutonit, zum Tiefengestein, beispielsweise zum Gabbro oder eventuell bis zum Granit führen, oder die das Magma, die Lava, an der Erdoberfläche zum Vulkanit, wie zum Beispiel Basalt oder Trachyt, verfestigen lassen.

Die moderne Magmalogie hat die Wesensverschiedenheit zwischen Plutonismus und Vulkanismus scharf hervorgehoben und physiko-chemisch begründet.

Das plutonische Geschehen, im Gegensatz zum vulkanischen in der Gestaltung unserer Erdkruste ungleich bedeutungsvoller, kann nirgends direkt beobachtet werden. Wir sind völlig auf Deduktionen angewiesen, d. h. es muß der Petrologe «die in steinernen Lettern geschriebene Schrift» im wahren Sinne des Wortes lesen lernen, was in Großraumbeobachtungen bis herab zu minutiösem Mikroskopieren zu geschehen hat.

Mit dem Nachaußen-Streben der magmatischen Schmelzlösung (aus schwer- und leichtflüchtigen Anteilen bestehend) in Bereiche niedrigerer Temperaturen und Drucke (immer noch wesentliche Bedeckung) setzt ein fraktioniertes Kristallisieren ein, das eine enorme Stoffdifferenzierung, ein Stoffmigrieren der ursprünglich völlig dispers verteilten elementaren Stoffe auslöst. Das Festwerden zu einem Kristallaggregat, zu einem Gestein, vollzieht sich in einer Ausscheidungsfolge von verschiedenen Mineralien mit abnehmender Bildungsenergie (Abhängigkeit von Wertigkeit und Ionenradius). Zuerst scheiden sich Mg-Fe-Silikate aus, dann die entsprechenden Alumosilikate zuerst gefolgt von Ca- und

zuletzt auch von alkalihaltigen, stets unter vermehrter Anreicherung von Kieselsäure und Alkalien. Mit fortgeschrittener Kristallisation treten schließlich die in der Restschmelze sich immer mehr anreichernden leichtflüchtigen Magmenanteile (Wasser, Cl, F) auch ins Kristallgitter ein. Jetzt gelingt eine direkte experimentelle Wiedergabe nicht mehr, diese ist nur für die ersten trockenen Schmelzphasen möglich. Von ungeheurer Bedeutung, sowohl durch Experiment an Modellversuchen als auch durch unendlichfache Naturbeobachtung bestätigt, ist die Erscheinung, daß mit der Hauptkristallisation, die zu den als üblich erkannten verschiedenen Erstarrungsgesteinstypen führte, der Verfestigungsprozeß nicht abgeschlossen ist. Jetzt schließt sich nämlich eine reiche Serie von Nachgeburtsphasen an, die ganze geologische Epochen andauern können.

Es ist unmöglich, sich vorzustellen, wie ohne diese Phasenbildungen unsere heutige Kultur aussähe. Zweifellos besäßen wir kaum Gold, seltene Erden, das begehrte Kupfer, Blei, Silber, Kobalt, Beryllium, Wolfram, Molybdän, Uranerze. Es sei denn, wir wüßten diese Elemente, die als allgegenwärtige nur in Spuren ($^1/_{100}$ bis $^1/_{1000\,000}$ %) in der lithosphärischen Kruste dispers auftreten, anzureichern. Die Natur hat uns diese aussichtslose Bemühung erspart, denn die genannten Stoffe werden in diesen Nachphasen angereichert. Solche sind:

1. Pegmatitisch-pneumatolytische Restlösungen, also erhitzte, dampfreiche, vorwiegend noch silikatische Lösungen bei 700 ° bis 400 ° C. Diese können vor allem Be, Cs, Rb und K enthalten, die infolge ihrer zu kleinen oder zu großen Ionenradien bisher nicht in das Kristallgitter der sich abscheidenden Mineralien eingebaut werden konnten (Be zu klein, Cs, Rb, K zu groß). Gegenüber der magmatischen Hauptkristallisation nehmen Elemente mit einer durch 4 unteilbaren (durch 4 + 3 Rest-teilbaren) Isotopenmassenzahl erheblich zu. Das bedeutet zunehmende Kerninstabilität. Ebenso steigt die Menge an selbständig zerfallenden radioaktiven Elementen beträchtlich an und weiter tun dies die mehrwertigen Kationen in Form von großen Anionenkomplexen (NbO_3) — 1, (CeO_4) — 4, (PO_4) — 3, (WO_4) — 2; das alles bedeutet Senkung des Energieniveaus für diese typomorphen pegmatitischen Bildungen. Dann schließt bei fortschreitender Druck- und Temperaturabnahme

2. eine hydrothermale Phase mit Absätzen aus warmen wässrigen Lösungen (400—100 °) an die pegmatitisch-pneumatolytische an und

bringt eine weitere Trennung der chalkophilen schwermetallischen von den vorangegangenen schwerflüchtigen lithophilen; es lösen sich hauptsächlich metallische Stoffe in leichtflüchtigen halogenidischen Fraktionen im Zusammenauftreten mit Wasserdampf, Kohlensäure und Schwefelwasserstoff. Die Abscheidung geschieht entweder an leicht angreifbarem Nebengestein oder auf den nach der Hauptkristallisation sich bildenden Kontraktions-, Zerr- oder Setzungsspalten, wodurch typische «Gangbildungen», besonders «Erzgänge» entstehen.

Die meist ausgesprochene räumliche Differenzierung der auf den Erzgängen auftretenden verschiedenen Metalle bestätigt in musterhafter Weise die räumlich-zeitliche Gliederung der stofflichen Fällungsbedingungen; eine geklärte Metallogenese ist natürlich auch für den Bergbau von hohem Nutzen.

Und was haben wir nun dem Vulkanismus zu verdanken?

Die rasche Erstarrung des unter relativ geringen Drucken stehenden Schmelzflusses zum Lavagestein unter gleichzeitiger explosiver Ausstoßung der leichtflüchtigen Anteile als Gase und Dämpfe verunmöglicht eine reichgegliederte Phasenfolge und fraktionierte Stoffabgabe im Sinne des plutonischen Geschehens; wir Menschen werden lediglich zu unmittelbaren Zeugen der im Erdinnern aufgestapelten Kräfte, die sich hier in episodenhaften Beispielen äußern; wir sind dies bald mit staunender Bewunderung, bald mit dem Empfinden von Schrecken und Graus.

Der exogenen petrogenetischen Tätigkeit, dem äußern Stoffwechsel, ist naturgemäß ein anderer Laboratoriumsraum zugewiesen; er befindet sich an der Grenze zwischen Lithosphäre einerseits und Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre anderseits. Die unter magmatischen Verhältnissen mit hohen Bildungsenergien entstandenen und chemisch kompliziert zusammengesetzten silikatischen Kristallassoziationen befinden sich hier nicht mehr im Gleichgewicht, sie werden aufgesprengt, verwittern, bilden Böden und schließlich nach Umtransport durch Wind, Wasser, Gletscher, die Sedimente.

Mit dem Boden schaltet sich, wir wissen es nicht wie, eine andere Welt ein, die biologische, die Welt der Organismen, und damit ist ein ganz besonderes thermodynamisches Feld entstanden, das zu ungeheuren geochemischen Arbeitsleistungen führt, an welchen sich zunächst die Mikroorganismen in hervorragender Weise beteiligen. VERNADSKY zog vergleichsweise die Geschwindigkeit der Bakterienvermehrung heran, von welchen einige sich in 22 Minuten teilen. Bei idealisiert günstigen Bedingungen könnte die Nachkommenschaft einer solchen Bakterie nach 36 h

die ganze Erdoberfläche einschichtig überziehen, d. h. die Geschwindigkeit der Lebensübermittlung besitzt dann Schallgeschwindigkeit, 330 m/s.

In den wenigen obersten Zentimetern eines Wiesenbodens kann sich schon eine Mikrofauna mit einer Wohndichte von Milliarden Einzelindividuen in 1 g Boden einstellen, d. h. mit 20 000 kg/ha Gewicht. Der Boden ist deshalb für den Mineralogen das allerheterogenste; obwohl sich die Prozesse vor der Haustüre abspielen, sind die hier auftretenden Probleme schwieriger überblickbar als die in sich abgeschlossenen Systeme der magmatischen Tiefe. Es bleibt dem Pedologen vorbehalten, das hier innige Zusammenspiel ionenchemischer, kolloid-chemischer, physikalischer und biologischer Vorgänge zu klären. Von den Böden ausgehend, die noch viel primäres Gesteinsmaterial enthalten, werden die verschiedenen Elemente, die im primären magmatischen Mischkristall als gleichberechtigte Bausteine auftreten, über zunächst während der Verwitterung entstehende hydroxydische Verbindungen getrennt. Die Trennung erfolgt gemäß der Größe eines Koeffizienten mit der Wertigkeit im Zähler und dem Ionenradius im Nenner. Elemente mit großem Koeffizienten bleiben am Ursprungsort zurück, diejenigen mit kleinstem haben größten Migrationswert und wandern am weitesten.

Zu den unbeweglichen gehört das Si als kristallisierte Kieselsäure, Quarz, zusammen mit Titansäure und Zirkon, gewisse gediegene Metalle und Diamant. Sie bilden die Rückstände im engeren Sinne.

Zu den beweglichen zählen die Alkalien und teilweise Erdalkalien, die, bis ins Meer verfrachtet, dort bei gegebenen Austrocknungserscheinungen als Evaporate, Salze, wiederum auskristallisieren. Dazwischen liegen Stoffgruppen, die als Hydrolysate, Oxydate, teilweise auch als Karbonate und Sulfate differentes Verhalten aufweisen. Es sind dies Si, Al, Fe, Mg, Ca, das Si als gelöster Silikatanteil. Die Trennung erfolgt, weil ihre hydroxydischen Verbindungen nicht gleich stabil sind, und sie vor allem gegenüber den in der Verwitterungskruste durch Klima und Vegetation leicht beeinflußbaren und daher wechselnden p_H-Werten verschieden löslich bzw. fällbar sind. Die Trennung Si-Al ist in dieser Hinsicht bemerkenswert: Anreicherung des Si in Verkieselungshorizonten, des Al auf Verwitterungsoberflächen in für die Al-Gewinnung wichtigen bauxitischen Lagerstätten.

Analog wie das Al tendiert das Fe sich als Rückstand hydroxydisch-oxydisch auf Verwitterungsoberflächen anzureichern, wobei ihm die Fähigkeit in die höhere 3-Wertigkeit und in die höhere Ionisationsstufe überzugehen behilflich ist. Wirtschaftlich höchst bedeutsame Fe-Kon-

zentrationen vermögen sich aber auch aus einem marinen Milieu unter gewissen geographisch-geologischen Bedingungen (Grundwasser und Einspülungen vom nahen Kontinent her) zu bilden, wobei die im Meerwasser vorhandenen Eisengele als Oolitherze ausfallen (Lothringen, Jura, Nordamerika). Bei der Fällung des Fe ist die Mitwirkung von Bakterien keineswegs ausgeschlossen. Wenn das Ozeanwasser nur $^1/_{5000\,000}$ Gew.% Fe enthält, dieLithosphäre dagegen 4 (vierthäufigstes Element), so zeigt das an, daß praktisch alles Fe auf dem Kontinent zurückbehalten und das wenige eingespülte leicht ausgefällt wird.

V. M. Goldschmidt versuchte den Prozeß der Verwitterung des Eruptivgesteins bis zum neuen Sediment quantitativ zu erfassen; auch die bei Kreislaufprozessen, beispielsweise des Kohlenstoffs umgesetzten Mengen sind berechnet worden. Dabei interessieren nicht nur die Schwankungen des Kohlendioxydgehaltes der Atmosphäre, welche die klimatischen Verhältnisse der Erdoberfläche in früheren Zeiten beeinflußten, sondern die stets wachsende Kohlendioxydzufuhr durch die industrielle Tätigkeit des heutigen Menschen, durch welche der CO_2-Gehalt der Atmosphäre in etwa 250 Jahren sich verdoppelt, wenn nicht durch den ausgleichenden Einfluß des Meeres dieser Zuwachs wieder abgefangen würde.

In hohem Ausmaße ist die Geochemie des Ca, die Kalksteinbildung, von den Kohlensäurekonzentrationen abhängig, sei es bei direkt chemischer oder indirekt über Organismen führender Fixierung (Hartteile von Pflanzen und Tieren). Dies gilt teilweise auch für das Mg; beide Elemente können aber auch in die Evaporatgruppe hinüberrutschen und bei sulfatischer Ausscheidung (Frühstufe der Salzausscheidung) können sich schon Abzweigungen nach dem biochemischen Schwefelkreislauf ergeben. Durch diesen regeln sich vielfach die Absätze aus schwermetallhaltigen Grundwässern und Einspülungswässern (Bildung sedimentärer Fe-Cu- und Zinksulfide). Auch das vagierende Si-hydrosal kann durch pflanzliche und tierische Organismen gefällt werden (Diatomeen-, Radiolarien-Quarzite).

Endlich noch eines: Es ist möglich, daß die eben bei der Verwitterung entstandenen ionaren Si- und Al-hydroxyl-Lösungen wieder gegenseitig in Reaktion treten und als tonig-kaolinartige Blätter- oder Phyllosilikate ausgeschieden werden. Das Wesen dieser tonigen Verwitterung mit der Neubildung zahlreicher Al-hydrosilikatischer Verbindungen ist in den letzten Jahren eingehend erforscht worden, da die entstandenen Stoffe nicht nur für die Bodenbildung, sondern für viele technische Zwecke von großer Bedeutung sind. In der Kleinheit der entstandenen Kriställchen

(unter 0,02 mm Durchmesser) und in ihrer vorwiegenden Schichtgitternatur liegen die ausnutzbaren Eigenschaften begründet (tonverarbeitende Industrie, Knetbarkeit, Absorptions-Resorptionsmittel, Thixotropie).

Wir sehen uns nun noch kurz im dritten Laboratorium um, wo infolge verändertem Druck und veränderten Temperaturen in der Erdkruste neue Gleichgewichtseinstellungen ausgelöst werden. So können aus Sedimenten durch zunehmende Überlastung und Versenkung in die Tiefe unter statischen Bedingungen konstruktive Aufmetamorphosierungen sich vollziehen und schließlich bei vollständiger Umkristallisation eruptivgesteinsmäßig beschaffene Mineralassoziationen resultieren. Im Gegensatz dazu ist es möglich, daß sich Eruptivgesteine in höheren Niveaus bei einseitig wirkenden tektonischen Kräften (Überschiebungen) unter gleichzeitigem Ab- und Umbau der mineralischen Eruptivgesteinskomponenten zu sedimentär aussehenden Gesteinen umformen (destruktive Metamorphose). Meistens verschränken sich im selben Großumformungsakt geologisch-tektonischer Umwälzungen der Erdkruste destruktive und konstruktive Phasen in inniger, zeitlich überlappender Weise; sie selbst wirken sich bald mehr chemisch, bald mehr physikalisch aus, und müssen im großen und ganzen doch als Reaktionen zwischen Festkörpern angesehen werden, da in keinem Moment das Ganze in molekulardispersen Zustand geriet. Die statischen Gesetze der Thermodynamik geben die Richtung der zu erwartenden Reaktion an, ohne daß sie in allen Fällen eintritt (metastabil), die Kinetik dagegen beeinflußt die Reaktionsgeschwindigkeit, der eine Reihe katalytischer Momente zu Hilfe kommen: So die stets, wenn auch nur in geringen Mengen vorhandene Porenflüssigkeit, weiter die unabgesättigten Randgebiete der Kristallgitter der verschiedenen aneinander grenzenden Ausgangsmineralien, die Differentialbewegung zwischen den einzelnen Mineralkörnern, die höhere Diffusionsgeschwindigkeit und Mobilität bei gesteigerter Temperatur.

Das alles ermöglicht schließlich vollends unter Berücksichtigung der dem Prozeß zur Verfügung stehenden Zeit, mit der unsere Experimente nie rechnen können, eine Neuanpassung, der wir die Entstehung unserer Erdkruste zu verdanken haben, welche niemals als ursprüngliche Erstarrungshaut aufzufassen ist, sondern die ein polymetamorphes Substratum ist, zu kristallinen Schiefern, zum Grundgebirge geworden ist, auf welchem die jungen, durch Fossilien belegten Sedimentablagerungen und vulkanischen Ausfluß- und Ausstoßprodukte diskordant auflagern.

Nirgends im petrogenetischen Geschehen kommt die Bedeutung des Kristalls als Überträger der Handlung, als eigentlicher Aktivator, so zum Ausdruck, wie bei den metamorphen Vorgängen. Diese müssen als Metasomatosen, als «Verdrängungen», gedeutet werden. Die häufig auf halbem Wege stehen gebliebene Reaktion läßt sich in fixierter Erstarrung im Mikroskop verfolgen und zeigt, daß bei gegebenen Druck- und Temperaturwechseln Partial-Gradienten freier Energien Elemente des einen Stoffes im Austausch gegen andere Elemente des zweiten Stoffes dirigieren. Das ganze stellt ein inniges Wechselspiel sowohl von intrakristallin als auch von interkristallin wirksamen Kräften dar.

Solchen Kräften liegt zum Beispiel die Granat- und Staurolithbildung aus Tonschiefern, Sprossung dieser Kristalle in der Festmasse unter Abbildung des Altbestandes und seiner Textur zu Grunde. Es sind dies schon weitgehend Anklänge an Granitisierung, Migmatitisierung als Konkurrenzbildung zur Granitbildung. Das differentielle Inlösung-Gehen und Migrieren der alkalischen und kieselsäurereichen Anteile eines Gesteinsbestandes führt zu solchen Angleichungen, Alkalisierungen und Verkieselungen und Injektionen, die kristalline Schieferbildung. Dies belegt die Kreislaufprozesse, welche unsere stets dynamisch bewegte Erdkruste vollführt; nichts ist tot, stets ist alles bestrebt, Gleichgewichtseinstellung zu erreichen.