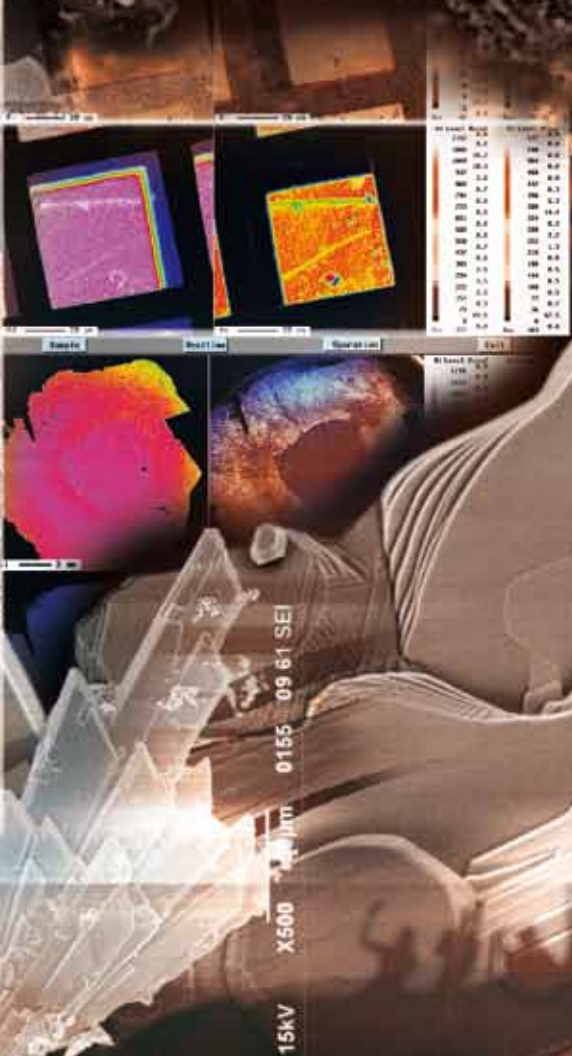


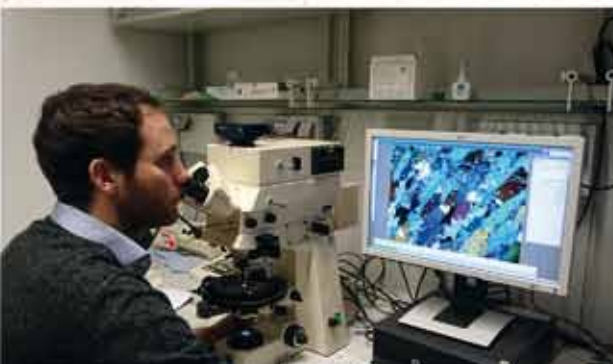


MINERALOGIE

Material- und Geowissenschaft



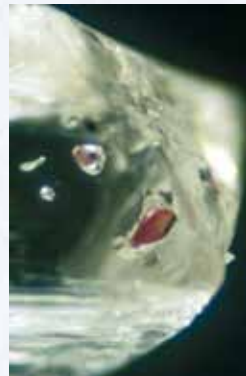
DMG
Deutsche
Mineralogische
Gesellschaft



Inhalt

*Meteoriten im
antarktischen Eis*

- Seite 02: Von Atom bis Zeolith – wie die Mineralogie wurde, was sie ist
- Seite 04: Mineralogie an der Wiege des Sonnensystems
- Seite 06: Reise zum Mittelpunkt der Erde
- Seite 14: Vom Massenspektrometer zur Hochdruckpresse
- Seite 20: Kristalline Geheimnisse
- Seite 22: Materialien der Angewandten Mineralogie
- Seite 26: Mineralogie und Geochemie in der Umwelt- und Klimaforschung
- Seite 30: Mineralogische Detektivarbeit
- Seite 31: Mineralische Rohstoffe und ihre Veredelung
- Seite 34: Mineralogiestudium an deutschen Universitäten
- Seite 35: Bildnachweis
- Seite 36: Impressum



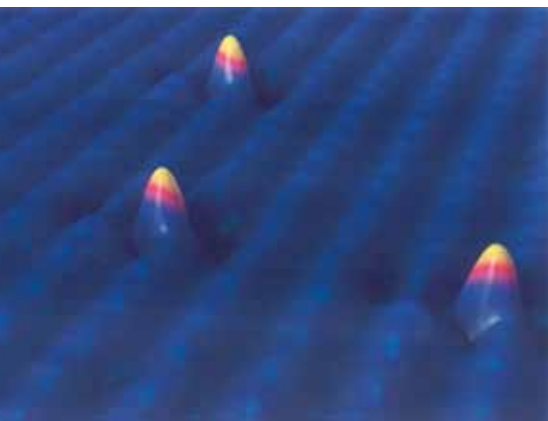
Von Atom bis Zeolith – wie die Mineralogie wurde, was sie ist

Quite diverse, höchst verschieden, nennt die renommierte Encyclopaedia Britannica die Forschungsgegenstände der Mineralogie und hat damit ganz recht: Mineralogen interessieren sich für das Innere der Erde ebenso wie für die Atmosphären ferner Sterne und können zwischen beiden Gebieten hoch interessante Zusammenhänge herstellen.

Die Entdeckung des modernen Weltbildes im Großen ... (Holzschnitt aus dem 19. Jahrhundert)



... und im Kleinen: Dotieratome über dem Atomraster einer Halbleiterfläche – Aufnahme mit dem Rastertunnelmikroskop



Zerodur-Spiegelträger mit geringster Wärmeausdehnung



Wer etwa weiß, dass in den heißen Hüllen kohlenstoffreicher Sterne Diamanten entstehen, wird versucht sein mit ähnlichen Gegebenheiten Diamanten im Labor zu machen. Das gelingt mittlerweile mühelos; als Beschichtung aus einer Gasphase helfen die so entstehenden Mikrodiamanten, die Lebensdauer hoch beanspruchter Werkzeuge zu verlängern.

Die Pioniere der Herstellung größerer Diamanten wurden durch das Studium von Meteoriten auf die Spur zum Erfolg geführt. Die genaue Analyse der in Meteoriten enthaltenen Diamanten wiederum enthüllt die Zusammensetzung des Urnebels, aus dem das Sonnensystem entstand. Einschlüsse in Diamanten aus der Tiefe der Erde geben Feinheiten zum stofflichen Aufbau des Erdmantels preis.

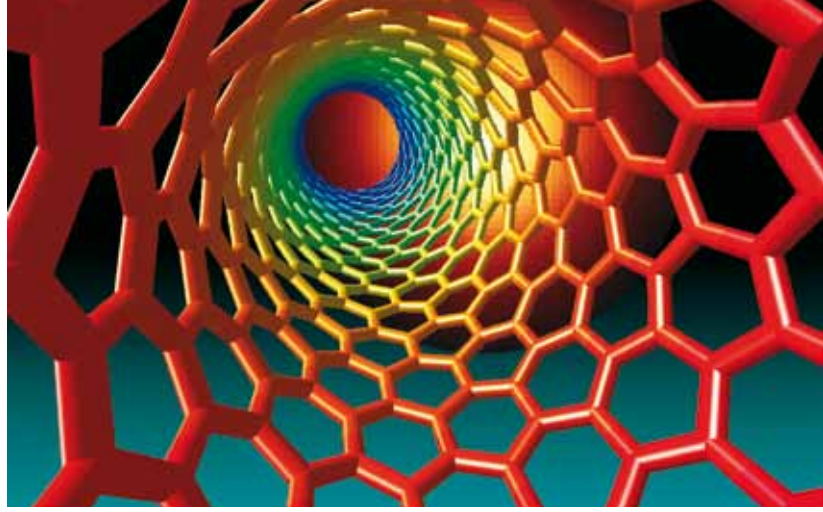
Noch einmal die Sterne: Beim Versuch, spektrale Details der Sterne durch die Nachbildung ihrer Atmosphären im Labor zu deuten, wurde ein Verfahren zur Herstellung von Fullerenen entdeckt, Makromolekülen aus Kohlenstoffnetzen, die jetzt zur Grundlage einer neuen Werkstoffgruppe mit spektakulären Eigenschaften werden.

Auch an der Bestimmung von Sternspektren ist die Mineralogie beteiligt, Teleskopspiegel werden meist aus Zerodur gefertigt, einer speziellen Glaskeramik, die bei Temperaturwechseln ihre Form kaum verändert. Die Formstabilität sichert diesem Werkstoff auch eine Schlüsselstellung bei der Herstellung der Computerchips der nächsten Generationen, denn Optiken für die kommende Nano-Lithographie, die Herstellung von Nanometer feinen Chipstrukturen durch Belichtung, müssen unempfindlich gegen Temperaturschwankungen sein. Weniger anspruchsvolle Glaskeramiken werden für pflegeleichte Elektroherdplatten und vieles andere mehr eingesetzt.

Das Forschungsfeld der Mineralogie nimmt nicht nur weite Räume in Anspruch, es hat auch eine ehrwürdige Vergangenheit, welche die Entwicklung des modernen Weltbildes entscheidend

Erdbebenanalysen mit Radar
vom Weltraum aus

*Beteigeuze, ein Roter Riesenstern,
hinter einem Nanoröhrchen aus
Kohlenstoff-Atomen. Solche Fullerene
entstehen in Sternatmosphären
ebenso wie winzige Diamanten,
Korund etc. Fullerene wurden bei dem
Versuch entdeckt, Sternatmosphären
im Labor nachzubilden.*



mitgeprägt hat. Seit jeher haben sich Menschen für Minerale interessiert, nicht nur ihrer technischen Verwertbarkeit wegen sondern auch, weil ihre häufig beobachtete kristalline Regelmäßigkeit auf ein verborgenes Ordnungsprinzip hinzudeuten schien, das sich schließlich als der atomare Aufbau der Materie herausstellte: Atome neigen dazu, sich wie die Orangen im Basar zu stapeln und bilden dabei regelmäßige Flächen und Muster.

Der unmittelbare Beweis des atomaren Aufbaus der Kristalle gelang erst 1912 durch die Röntgenbeugungsexperimente von Max von Laue und anderen, in deren Folge auch ein Mittel zur detaillierten Entschlüsselung der atomaren Struktur der Minerale, überhaupt aller kristallisierten Materie, zur Verfügung stand.

In jüngerer Zeit sind neben die immer raffinierteren Röntgengeräte weitere Instrumente wie die Elektronenstrahl-Mikrosonde getreten, die die elementare Zusammensetzung etwa einer Gesteinsprobe oder einer Legierung im Mikrometer-Maßstab ermöglicht. Methoden der Massenspektrometrie sind in ähnliche Dimensionen vorgestoßen. Den modernen Mineralogen liefern aber auch die eher traditionellen optischen Geräte wichtige Informationen, das Mikroskop hat keineswegs ausgedient. Insgesamt ist der mineralogische Gerätepark höchst vielseitig, was die Industrie zu schätzen weiß: Mineralogen wissen mit vielen verschiedenen Instrumenten umzugehen, was ihren Einsatz in den Geowissenschaften, der Materialforschung wie der Mikroelektronik ermöglicht. Schließlich wird der „Stein der

Weisen“ der Moderne, das Silizium, aus einem wohlbekannten Mineral gewonnen, aus Quarz, Siliziumdioxid.

Die Deutsche Mineralogische Gesellschaft definiert das Fach Mineralogie so:

Mineralogie ist die materialbezogene Geowissenschaft. Sie erforscht die chemischen, physikalischen und biogenetischen Eigenschaften der Materie und deren Rolle in den Prozessen des Sonnensystems mit seinen Planeten und Monden. Ihre Methoden und Konzepte zielen gleichermaßen auf die Erforschung natürlicher und synthetischer Stoffe und deren Anwendung.

Ein weites Feld.

*Motor mit Wicklungen aus einem keramischen
Hochtemperatur-Supraleiter
(Insert: Mikrostruktur eines Hochtemperatur-Supraleiters)*



Mineralogie an der Wiege des Sonnensystems


Orion-Nebel (Detail)

Der Urnebel

Beim Urknall vor ca. 13,8 Milliarden Jahren entstanden lediglich Wasserstoff und Helium. Bereits 200 Millionen Jahre später gab es die ersten Sterne, die Geburtsstätten aller anderen Elemente. Aus den von Sonnenwinden, Supernova-Explosionen und Auswürfen Roter Riesen freigesetzten Elementen der ersten Sternenerationen bildeten sich neue Sonnensysteme, die teils wieder zerfielen ...

Unser Sonnensystem entstand vor 4,57 Milliarden Jahren durch den Kollaps einer interstellaren Molekülwolke, vielleicht durch die Schockwellen einer Supernova angestoßen. Die Sonne begann sich zu bilden und immer mehr Materie zu „schlucken“. Ein kleiner Rest, 0,14 % der Materie des Sonnensystems, blieb jedoch übrig. Der größte Teil dieser Restmaterie begann durch ständige Zusammenstöße zu immer größeren Körpern zu wachsen und bildete die Planeten. Wie mit dem Weltraumteleskop ALMA in der chilenischen Atacamawüste beobachtet wurde, findet dieser Prozess der Planetenbildung auch heute bei anderen Sternen statt. Unser Planet Erde erreichte seine Größe nicht durch ständiges Herabrieseln von Staub, sondern durch das Bombardement von mondgroßen Planetesimalen. Unter der Einwirkung der Schwerkraft sanken in der noch flüssig-heißen jungen Erde schwere metallische Elemente wie Fe, Ni, Co etc. nach unten, es entstand der Erdkern. Die umgebende silikatische Hülle spaltete sich durch lokale Schmelzprozesse auf in den heutigen Erdmantel und die Erdkruste.

An Entwurf und Ausgestaltung dieses imposanten Bildes war und ist die Mineralogie maßgeblich beteiligt. Denn nicht nur geologische Prozesse haben Spuren in Mineralen hinterlassen, die Natur hat auch ein mineralisches Archiv über den solaren Urnebel angelegt und darin sogar Details über die Evolution der Sterne festgehalten. Dieses Archiv besteht aus den zahlreichen meist kleinen Himmelsobjekten, die der Verdichtung der protoplanetaren Scheibe zu Sonne und Planeten entgingen und seither in Trümmerfeldern einher treiben, wie dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter, dem Kuiper-Gürtel jenseits der Pluto-Umlaufbahn oder der Oort-Wolke, einer Kugelschale um das Sonnensystem. Die Oort-Schale enthält womöglich auch Neuzugänge aus der kosmischen Nachbarschaft der Sonne. Ab und an lenken die Verhältnisse einen dieser Himmelskörper als Meteorit oder gar Asteroid auf die Erde, und dann schlägt die Stunde der Mineralogen.



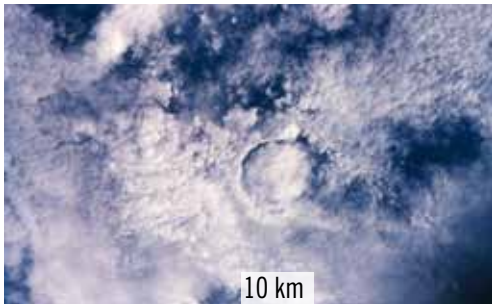
Junger Stern im Orion-Nebel mit einer protoplanetaren Scheibe aus Gas und Staub, aus der Planeten entstehen können.

Innenbereich der Staubscheibe um den jungen Stern HL Tauri, aufgenommen mit dem VLA. Der separate Fleck bei rund 10 Uhr könnte ein Planetenembryo sein - eine Region, in der gerade ein Planet entsteht.



Ferne Vergangenheit

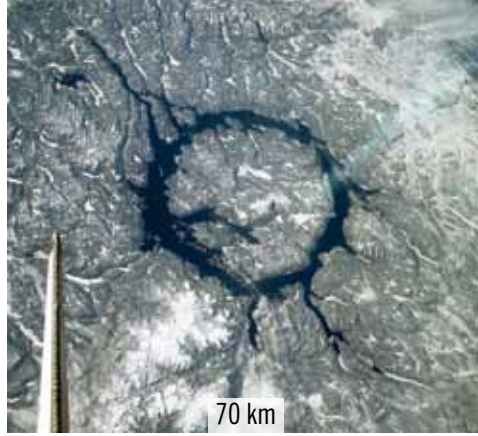
Zu der aufschlussreichen Beschreibung der Chemie und der mineralischen Phasen eines Meteoriten sind in jüngerer Zeit raffinierte Analysen der Isotopenverhältnisse getreten. Damit hat sich der Wissenschaft ein neues, hochinteressantes Terrain erschlossen, denn in „primitiven“, also ursprünglich zusammengesetzten Meteoriten finden sich in Spuren feinste mineralische Körner aus Diamant, Siliziumcarbid, Korund (Aluminiumoxid), Siliziumnitrid etc., deren isotopische Zusammensetzung extrem stark variiert, da die ursprüngliche Signatur ihrer Entstehung im Inneren von Sternen



Lake Bosumtwi, Einschlagkrater, Ghana

noch erhalten blieb. Diese winzigen Körnchen sind älter als das Sonnensystem selbst. Ansonsten wurde die Materie bei der Entstehung des Sonnensystems gut durchmischt und ist somit isotopisch erstaunlich gleichförmig.

Mit modernster Analytik kann man die Isotopenzusammensetzung des Urans, sowie die des Tochterelements Blei so genau messen, dass man das Alter von Meteoriten und ihren Mineralen und Einschlüssen mit einem Fehler von kleiner als 0,01 % genau bestimmen kann. Somit konnte man zum Beispiel feststellen, dass die ersten Kondensate in unserem Sonnensystem vor 4,566 Milliarden Jahren in einem sehr kurzen Zeitraum von nur ca. hunderttausend Jahren aus dem solaren Urnebel kondensiert sind. Die ersten differenzierten Protoplaneten bildeten sich bereits wenige Millionen Jahre später. Die Erde hingegen brauchte einige weitere zehn Millionen Jahre bis sie – nach einer gigantischen Kollision mit einem ca. marsgroßen Körper, aus dessen Trümmerfeld sich auch der Mond bildete – ihre heutige Größe erreichte. Das geht aus der Analyse kleinster Variationen der Häufigkeit des Wolfram-Isotops ^{182}W in Meteoriten und irdischen Gesteinen hervor.

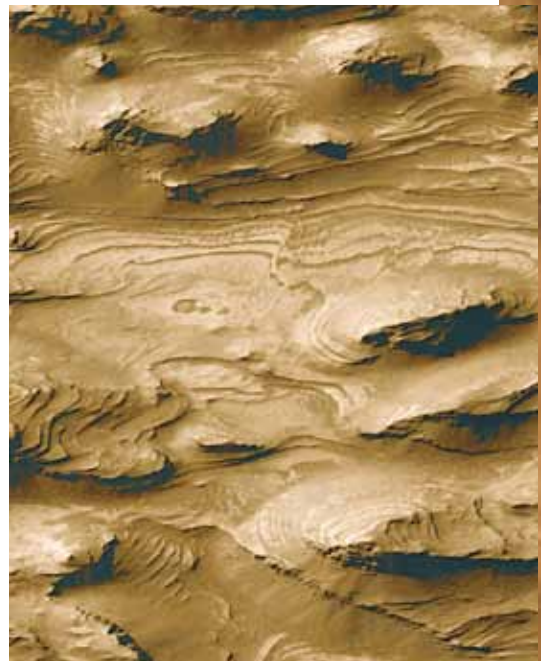


Bruder Mars

Auch der Mars ist mineralogisches Terrain. Etwa 130 Meteorite wurden bislang als Bruchstücke des Roten Planeten identifiziert. Diese wurden durch einen Meteoriteneinschlag dort so stark beschleunigt, dass sie das Schwerefeld des Mars verlassen konnten und nach langem Flug durch das All schließlich auf der Erde landeten. Viele der Marsmeteorite haben als Erinnerung an den Einschlag Mineralmodifikationen im Inneren behalten, die nur bei Hochdruck entstehen.

Andere Mars-Meteorite besitzen Karbonate, die darauf hindeuten, dass es früher flüssiges Wasser auf dem Mars gegeben hat und somit einmal deutlich wärmer gewesen ist als heute, wo Wasser nur noch in Form von Eis an den Polkappen des Mars vorkommt. Wegen ihrer kettenartigen Struktur wurden einige dieser Karbonate bei ihrer Entdeckung sogar als Mikrofossilien gedeutet. Auch bei diesen Untersuchungen ist die Mineralogie mit Struktur- und Isotopenanalysen beteiligt.

Rätselhafte Gräben und Terrassen auf dem Mars – Werke einstiger Wassermassen?

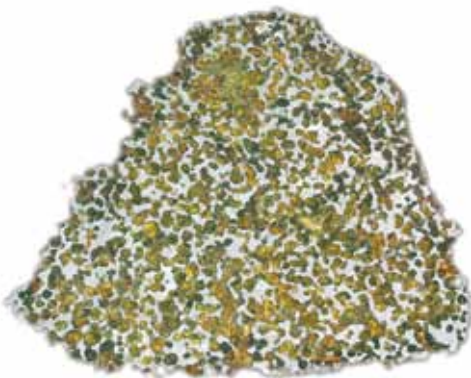


Reise zum Mittelpunkt der Erde

Eine der großen Leistungen der Mineralogie ist die Ausgestaltung des modernen naturwissenschaftlichen Weltbildes.



Steinmeteorit (Chondrit)



Steineisenmeteorit, Pallasit (Olivin, FeNi-Metall)



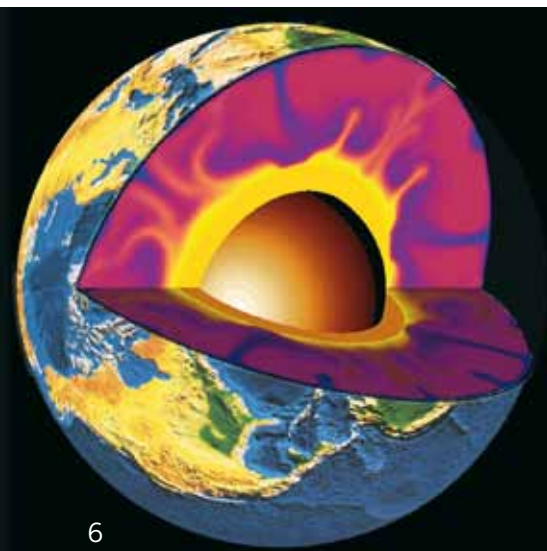
Angeätzter Eisenmeteorit mit Widmansstättenschen Figuren

Die Entdeckung des – an den alten Vorstellungen gemessen – ungeheuerlichen Alters der Erde, besonders dessen Präzisierung, ist der Entwicklung hochgenauer Datierungsmethoden zu verdanken, die den radioaktiven Zerfall verschiedener Isotope als Zeitmaß verwendet. Diese Methoden setzen eingehende mineralogisch-kristallographische Kenntnisse und große Sorgfalt voraus. Dann aber kann – etwa anhand von Uran-Isotopenanalysen an den Mineralen Merrillit und Apatit in kohligem Chondriten – z. B. das Alter von Einschlüssen des Allende-Meteoriten mit 4,567 Milliarden Jahre auf weniger als 1 Million Jahre genau bestimmt werden. Das ist die Zeit, zu der die ersten Körper aus dem Gas und Staub des solaren Urnebels entstanden, darunter die Erde.

Die junge Erde

Das Wachsen des Erdballs stellt man sich heute gleichsam fraktal und von verschiedenen Kräften gestaltet vor: Zuerst kondensierten die Elemente des heißen Urnebels zu Staub, der durch elektrostatische Kräfte zu Flocken zusammenfiel. Durch Zusammenstöße bildeten sich metergroße Klumpen, die die Gravitationskraft schließlich zu Planetesimalen und Mini-Planeten zusammentrieb. Diese wiederum verbanden sich in gigantischen Kollisionen zu den heutigen Planeten.

Die junge Erde wurde von mehreren Quellen mit Energie gespeist; zum einen hatten die in ihr zur Ruhe gekommenen Körper eine beträchtliche Bewegungsenergie mitgebracht, die sich in Wärme umgewandelt hatte, zum anderen war die kondensierte Materie teilweise radioaktiv und steuerte große Mengen Zerfallswärme bei. In der Folge begann das Material zu schmelzen und sich in eine schwere Metallschmelze überwiegend aus Eisen und eine leichtere oxidierte Schmelze aus silikatischen Verbindungen zu entmischen, was noch mehr Wärme frei setzte. Die Metallschmelze sank aufgrund ihrer höheren Dichte nach unten und bildete den Erdkern, während aus der leichteren Silikatschmelze der Erdmantel entstand.



Die starre Erdkruste ist im Vergleich dünn wie eine Eierschale. Darunter der fast 2900 km mächtige Erdmantel, der zähfließende Verformungen und Wärmeströme zulässt. Im Inneren der Kern aus außen flüssigem, innen festem Eisen.

Plattentektonik

Die äußerste Schicht der Erde, die Lithosphäre, ist ein puzzleartiges Mosaik von etwa einem Dutzend großer, starrer Platten, die sich relativ zueinander mit wenigen Zentimetern pro Jahr bewegen – so schnell, wie Fingernägel wachsen. Die Platten sind unter den Kontinenten meist mächtiger als unter den Ozeanen, im Durchschnitt 80 Kilometer

extrem langsam in geologischen Zeiträumen von hunderten von Millionen Jahren ablaufen. Von den Bewegungen dieser „Suppe“ parallel zur Erdoberfläche werden auch die Platten mitgenommen.

An auseinander treibenden Plattengrenzen wird durch die Förderung von Gesteinsschmelzen neue ozeanische Kruste gebildet, die an den sogenannten Subduktionszonen wieder abtaucht. Die enormen Reibungskräfte beim Abtauchen der Platten bauen Verspannungen auf, die große Gesteinsareale verformen können, was von Erdbeben begleitet wird. Es waren solche Erdbeben, durch die abtauchende Platten mit seismischen Methoden zunächst bis in Tiefen von 700 km nachgewiesen werden konnten. Mit seismischer Tomographie lässt sich inzwischen zeigen, dass Platten in noch größere Tiefen absinken können, vermutlich bis zum Erdkern. Die Grenze der kollidierenden Platten wird durch Tiefseegräben, begleitet von vulkanischen Inselbögen, markiert. Dort, wo Kontinente aufeinander stoßen, entstehen unvorstellbare Deformationskräfte, türmen sich riesige Gebirge auf wie der Himalaja.



Das Höhenprofil der Erde enthüllt untermeerische Gebirge wie den mittelatlantischen Rücken.

dick und bestehen aus der relativ dünnen Kruste der Erde und den oberen 60–75 Kilometern des Erdmantels. Die Platten „schwimmen“ auf einer heißeren Schicht des Erdmantels, die sich durch einen Vorgang, den Materialwissenschaftler „Kriechen“ nennen, im festen Zustand langsam bewegt – Teil eines riesigen Zirkulationssystems vom Erdkern zur Erdoberfläche, das durch den globalen Wärmeaustausch angetrieben wird. Man kann es sich wie die Walzen in einer dicken und heißen Suppe vorstellen, mit dem Unterschied, dass die Erdbewegungen

Seafloor spreading

Was die Erde in den Tiefseegräben an Kruste nimmt, gibt sie an anderer Stelle wieder. Zwischen auseinander strebenden Platten, etwa am Mittelatlantischen Rücken – einem riesigen Gebirge mit Höhen bis zu 2500 m, dass sich von

Hochflüssige Lava formt im Kontakt mit Meerwasser Kissenstrukturen – Zeugnis für das „Sea floor spreading“.





Das deutsche Forschungsschiff METEOR senkt den Tiefseeroboter QUEST auf den Meeresboden ab.



„Black Smoker“ sind eine Art von Wasserpumpen, die von Meerwasser durchflutet werden. Die vom Wasser ausgelaugten chemischen Elemente werden als schwerer lösliche Verbindungen wieder ausgeschieden – ein wesentlicher Mechanismus der Lagerstättenbildung.

Norden nach Süden durch den Atlantik zieht – reißt die Erdkruste auf. Magma quillt auf und erstarrt zu neuer basaltischer Ozeankruste. Abgeschreckt durch den Kontakt der Schmelzen mit dem kalten Meerwasser bilden sich Kissenlaven als typische Formen der Ozeanbodenbasalte. Die Ozeanböden sind in den vergangenen Jahrzehnten weltweit intensiv erforscht worden. Von Schiffen aus angebohrt, liefert die Ozeankruste Gesteinskerne für petrographische und geochemische Untersuchungen, die bereits in Laboratorien an Bord beginnen. Aus der Konzentration von Spurenelementen wie den Seltenen Erden gewinnen Geochemiker Erkenntnisse zur Herkunft der Magmen. In Verbindung mit Isotopen der Elemente Blei, Strontium und Neodym, einem Element aus der Gruppe der Seltenen Erden, lässt sich zeigen, dass die Magmen aus dem oberen Teil des Erdmantels stammen. Wie aber kommt es zur Bildung von Schmelzen im Erdmantel, der aus festem Gestein besteht? Schmelzbildung durch Druckentlastung ist eine Antwort. Für Ergebnisse wie dieses führen die Petrologen und Geochemiker Laborexperimente unter Drücken von Zehntausenden von Atmosphären durch, die das Verhalten der chemischen Elemente in der Tiefe der Erde wiedergeben.

Während ihrer Erstarrung haben magnetisierte Minerale der Ozeankruste das wechselhafte Erdmagnetfeld wie auf einem Tonband festgehalten. Mit dieser Entdeckung schaffte die von Alfred Wegner vor 100 Jahren entwickelte Theorie der Plattentektonik (von ihm Kontinentaldrift genannt) vor knapp 60 Jahren ihren Durchbruch.

Black smoker

Der durch aufquellende Magmen strapazierte Meeresboden ist mineralogisch sehr interessant. Entlang der Ozeanrücken gibt es untermeerische Minivulkane, die wie eine Wasserpumpe arbeiten, über ein Gewirr von Kanälen Wasser an

den Hügelflanken einsaugen und es hoch erhitzt wieder ausspucken, beladen mit Elementen wie Eisen, Kupfer, Blei oder sogar Gold. Dabei bilden sich ökonomisch bedeutende Erzlagerstätten.



Wenn sich schließlich nach geologischen Zeiten der Meeresboden hebt, tritt ein „black smoker“-Feld als Erzlagerstätte zutage; hier: „Kidd Creek“, Kanada.

Von solchen Pumpen gibt es so viele, dass die ausgestoßenen Chemikalien die Meerwasserzusammensetzung signifikant beeinflussen und dessen Salzgehalt konstant halten. In nur wenigen Millionen Jahren wird so das ganze Wasser der Ozeane komplett recycelt.

Magmakammern

Das Studium der Lava, die etwa am Mittelatlantischen Rücken in riesigen Mengen aufsteigt, besonders das Studium der darunter liegenden Magmakammern und deren Simulation im Labor, hat aufregende Details über Kristallisationsprozesse zutage gefördert, die unter anderem erklären, wie die rhythmische Kristallisation von hellen Plagioklasen und dunklen Pyroxenen in Gesteinen zustande kommen, die in der internationalen Literatur als *layered gabbros* bezeichnet werden.

Es gibt neben diesen geologisch sehr schnellen Mineralbildungsprozessen auch sehr langsame, wie das Wachstum von Manganknollen am Meeresboden, die mitunter Millionen Jahre brauchen. Manganknollen könnten zu wichtigen Erzlieferanten werden, wenn es gelänge, sie einfach und umweltschonend zu bergen.



Messtrupp beim Aufstieg auf den Merapi, Indonesien

Ring of Fire

Allein die hohe Explosivität weist darauf hin, dass an den Subduktionszonen spezielle Prozesse der Magmenentstehung ablaufen, für die Wasser eine entscheidende Rolle spielt. Wenn eine Platte ins Erdinnere abtaucht, heizt sie sich auf, wobei Wasser frei wird, das in den darüber liegenden Erdmantel aufsteigt. Petrologen haben in Hochdruckexperimenten zeigen können, dass dieses Wasser die Schmelztemperatur des kontaktierten Gesteins so stark erniedrigt, dass nun auch im gewöhnlich festen Erdmantel über der abtauchenden Platte Magmen entstehen können. Geochemiker haben weitere Indizien für diese Rolle des Wassers gefunden: In den Inselbogen- Vulkaniten finden sich vermehrt solche chemische Elemente, die von Wasser aus der abtauchenden Platte gelaugt und in die Region

transportiert wurden, in der die Vulkanit-Magmen entstanden. Mit Hilfe des nur an der Erdoberfläche durch kosmische Strahlung entstehenden seltenen radioaktiven Isotops ^{10}Be lässt sich sogar der Beitrag der Sedimentgesteine abschätzen, die sich auf der abtauchenden basaltischen Ozeankruste abgelagert hatten.

Die detaillierte Erforschung solcher Zusammenhänge kann ganz unmittelbar wichtig werden: Neben Erdbeben stellen vor allem auch Vulkanausbrüche ein erhebliches Gefährdungspotential für die dort lebende Bevölkerung dar, da der Vulkanismus an Inselbögen ausgesprochen explosiv ist. Die katastrophalen Folgen von Vulkanexplosionen in dicht besiedelten Regionen sind heute in den ausgegrabenen Ruinen-

Glühender Blockstrom am Merapi, Indonesien





Probenahme vulkanischer Gase auf White Island, Neuseeland

stätten Pompeji und Herculaneum am Fuß des Vesuvus zu besichtigen. Der Ausbruch des Mt. Pelée auf der Karibik-Insel Martinique im Jahr 1902 forderte 29.000 Menschenleben, die gesamte Bevölkerung der Stadt St.Pierre. Der Aufbau von Überwachungssystemen gefährlicher Vulkane stellt eine große Herausforderung für die Geowissenschaften dar. Neben geophysikalischen Methoden sind auch geochemische Messstationen zur Erfassung der Entgasungstätigkeit von Vulkanen gefragt.

Plumes

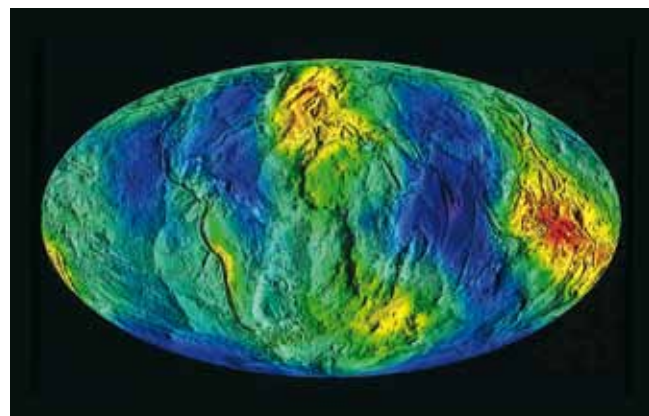
Äußerst beeindruckend allein ihrer schieren Größe wegen sind gigantische Vulkanbauten in den Weltmeeren. Die Vulkane Mauna Loa und Mauna Kea auf Hawaii erreichen Gipfelhöhen von mehr als 4.000 m, vom Meeresboden aus gerechnet ergeben sich Gesamthöhen von mehr als 10.000 m. Die Vulkane auf Hawaii werden von Plumes gespeist. Plumes sind thermische Anomalien mit Durchmessern von mehreren hundert Kilometern, in denen heißes Material aus großer Erdtiefe aufsteigt. Ähnlich wie unter den mittelozeanischen Rücken erfolgt die Bildung von Teilschmelzen in den Plumes in relativ geringer Tiefe durch Druckentlastung. Mehrere Plumes sind inzwischen durch seismische Tomographie

nachgewiesen worden. Was aber ist ihr Ursprung? Hier kommt wieder die Isotopengeochemie ins Spiel. Es sind erneut die radiogenen, aus einer radioaktiven Zerfallskette stammenden Blei-Isotope in Vulkaniten der Ozeaninseln, die den Weg weisen. Sie lassen sich nur erklären, wenn an Uran angereichertes Material der Erdkruste auf dem Weg der Subduktion in den Erdmantel zurückgeführt wird. Diese Hypothese hat Unterstützung gefunden, nachdem es Geophysikern gelungen ist, mit Hilfe der Seismischen Tomographie das Abtauchen der Platten in den tiefen Erdmantel nachzuweisen. Hawaii ist das jüngste Glied in einer ganzen Kette von Vulkaninseln, deren Alter mit wachsendem Abstand von Hawaii zunimmt. Die Vulkanketten Hawaiis sind entstanden, als sich die Pazifische Platte über einen solchen Plume bewegte, ähnlich einem Blatt Papier, das über eine Kerzenflamme gezogen wird und braune Brandflecken bildet.

Botschaften aus der Tiefe

Nichts macht die Gewalt tektonischer Kräfte deutlicher als der Anblick der spektakulären Bergketten (zum Beispiel der Alpen, der Anden oder des Himalayas), die durch Plattenkollisionen und Subduktion entstanden sind. Solche Bergketten geben mit ihrem aktiven Magmatismus, ihren häufigen Erdbeben, Bergstürzen und ihrem starken Einfluss auf das regionale Klima ein beredtes Zeugnis der Ruhelosigkeit der Erdkruste. Vor mehr als dreißig Jahren ist deutlich geworden, dass durch Kollision und Subduktion sogar oberflächennahe Gesteine der kontinentalen Kruste in beachtliche

Das topographische Relief der Erde lässt Schlüsse auf ihr bewegtes Innenleben zu.

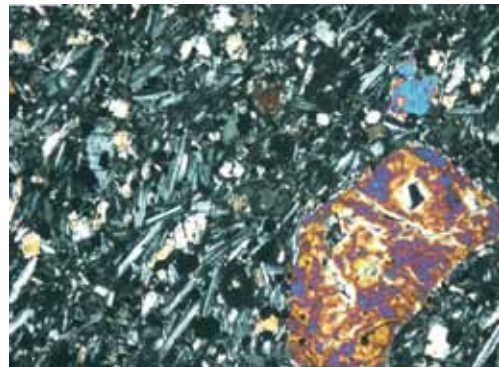


Tiefen transportiert werden können. Wenn solches Material wieder an die Oberfläche kommt, können Mineralogen dessen Reise durch das Studium seiner textuellen und mineralogischen Veränderungen rekonstruieren. So wird etwa ein feinkörniger Basalt (ein Gestein aus Feldspat, Pyroxen und gelegentlich Olivin) aus der ozeanischen Kruste in Tiefen von mehr als fünfzig Kilometern in grobkörnigen Eklogit (ein Gestein aus Granat und jadeitreichem Pyroxen) umgewandelt. Eklogite und die sie umgebenden Gneise des Erzgebirges etwa enthalten sogar winzige Diamanten und das Hochdruckmineral Coesit (mit der chemischen Zusammensetzung von Quarz); für die Entstehung beider Minerale sind Tiefen von 100

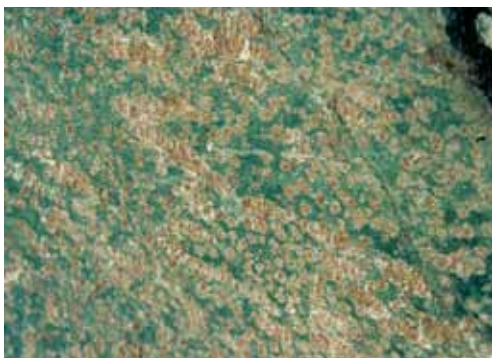
Reise zum Mittelpunkt der Erde? Die Mineralogen biegen lange vorher ab, selbst unter größten Anstrengungen können Proben durch Bohrungen nur aus Tiefen bis etwa zwölf Kilometern gewonnen werden. Mitunter aber werden mit Magma sogenannte Xenolithe aus Tiefen bis zu 300 Kilometern an die Erdoberfläche befördert, deren Name – Fremdgesteine – schon andeutet, dass sie in ihrer Umgebung eigentlich nichts zu suchen haben. Dabei handelt es sich meist um das Erdmantelgestein Peridotit und auch um Eklogit, die beide Diamanten enthalten können. Der Hauptbestandteil von Peridotit ist das Magnesium-Eisensilikat Olivin, dessen schleifbare Schmuckvarietät als Peridot bekannt ist. Xenolithe



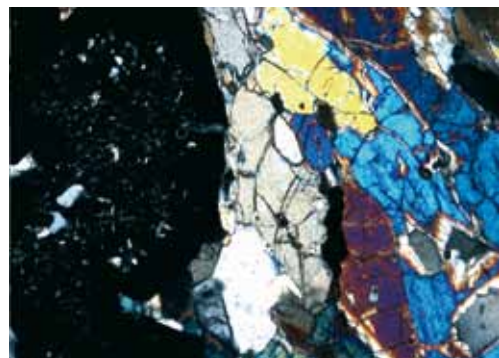
Basalt (Stricklava)



Basalt-Dünnschliff (große Olivin-Kristalle in einer an Plagioklas reichen Matrix)



Eklogit (rot: Granat, grün: Omphazit)



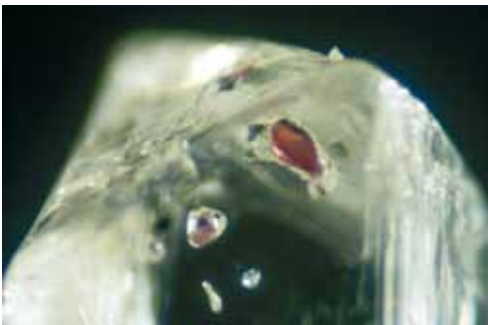
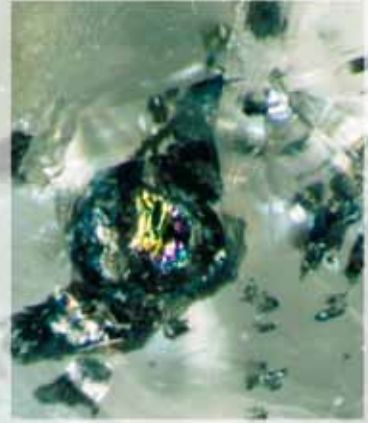
Eklogit-Dünnschliff zur Unterscheidung mineralischer Phasen.

bis 150 Kilometern notwendig. Der Umstand, dass Gesteine aus solchen Tiefen wieder an die Erdoberfläche gelangen, hat zu einer Revolution in unserem Verständnis von Art und Umfang geodynamischer Prozesse geführt. Das Vorkommen dieser Minerale im Erzgebirge könnte ein Indiz sein, dass einmal ein ganzer Kontinent in diese enormen Tiefen gezogen wurde, durch eine Plattenkollision vor über 300 Millionen Jahren.

verdanken ihre Existenz regelrechten vulkanischen Explosionen, die sie so schnell aus dem Erdinneren mitreißen, dass ihr ursprünglicher Zustand erhalten bleibt.

Auch das edelste, zumindest teuerste aller Minerale, der Diamant, bietet sich gelegentlich als Bote aus der Tiefe an, denn er enthält nicht selten Einschlüsse mit Mineralen vom Ort seiner Entstehung. Diese Einschlüsse lassen sich mit einem Lichtmikroskop studieren, mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde chemisch analysieren und im Elektronenmikroskop kristallographisch charakterisieren. Die Ergebnisse sind höchst aufregend. Als Einschlüsse fanden

*Durch
Zerfall von
Olivin unter
hohem Druck
entstandener
Ferroperiklas
(Mg,Fe)O*



Pyrop in Diamant (Ghana)

sich nicht nur Minerale, die man als Bestandteile der Erdmantelxenolithe kannte, sondern auch neue Minerale, in denen Silizium von sechs Sauerstoffatomen umgeben ist; Minerale, die bis dahin nur in Hochdruckexperimenten synthetisiert worden waren. Sie entstehen, wenn Peridotite, die Gesteine des oberen Erdmantels, mehrere 100 km ins Erdinnere transportiert werden. Unter dem dort vorherrschenden hohen Druck werden ihre Minerale instabil und wandeln sich in neue um. Ihrer Stabilität und ihres meist sehr hohen Alters wegen sind solche Diamanten bei Mineralogen besonders begehrt, als Zeitkapseln, die die Vergangenheit der Erde aufbewahrt haben.

Diamant muss sehr schnell aus der Tiefe hochkommen, beim langsamen Aufstieg wandelt er sich in Graphit um. Tatsächlich gibt es Graphitfunde, die noch die äußere Form eines Diamantkristalls zeigen.

Die Erde als Labor

Die wechselvolle Geschichte der Erde hat für mineralogische Prozesse ein riesiges Experimentierfeld mit großen Räumen und fast unendlichen Zeiten geschaffen, auf dem alle möglichen Kombinationen der chemischen Elemente zu mineralischen Körpern zusammen fanden. Die Mineralogie erschöpft sich nicht im Studium dieser Minerale und ihrer Funktion als Beweismittel in den Geo- und Astrowissenschaften. Mit der Erforschung der physikalisch-chemischen Zusammenhänge leistet sie gleichermaßen wichtige Beiträge für die kommerziell bedeutsamen Felder Lagerstättenkunde und Materialwissenschaften.

Im großen Laboratorium Erdkruste haben im Lauf der Zeit alle möglichen Elemente zu allen möglichen Mineralen, Formen und Farben zusammen gefunden.



Das Leben ist ein wesentlicher Teil des globalen Stoffkreislaufes.

Das große Umwälzen

Im Gegensatz zu Merkur, Venus und Mars verfügt die Erde über reichliche Mengen flüssigen Wassers. Ist die Temperatur der Erdatmosphäre so „angenehm“, dass sich Leben entwickeln konnte, enthält die Atmosphäre der Erde nur wenig Kohlendioxid (CO_2), dafür aber viel Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2). Erst diese Umstände ermöglichten die Entwicklung höher organisierter Lebewesen.

Wasser hätte für das Leben nur wenig Nutzen, wenn es nur als Gas oder Eis vorläge. Um Leben entstehen zu lassen, ist flüssiges Wasser notwendig. Um wiederum Wasser flüssig zu halten, ist eine gute Temperturregelung wichtig. Die mittlere Oberflächentemperatur der Erde beträgt 15°C (Vergleich Venus: 430°C). Der Grund hierfür ist ein globales Recycling eines der wirksamsten Treibhausgase, des Kohlendioxids (CO_2). Das entweicht dem Inneren der Erde ständig aus Vulkanen. Die meisten davon befinden sich über den Subduktionszonen, dort, wo Erdkruste abtaucht. Würde der CO_2 -Gehalt durch vulkanische Entgasung ständig ansteigen, würde der Treibhauseffekt die Temperatur immer weiter ansteigen lassen bis alles Ozeanwasser verdampft. So etwas ist mutmaßlich auf der Venus geschehen.

Auf der Erde dagegen wird der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre ständig reguliert; das Prinzip: Wenn Gesteine verwittern, werden Silikatminerale wie CaSiO_3 (stellvertretend für eine vereinfachte Erdkruste) im Boden durch Kohlensäure, H_2CO_3 , zersetzt. Es entsteht Calciumcarbonat, CaCO_3 , Kalk.

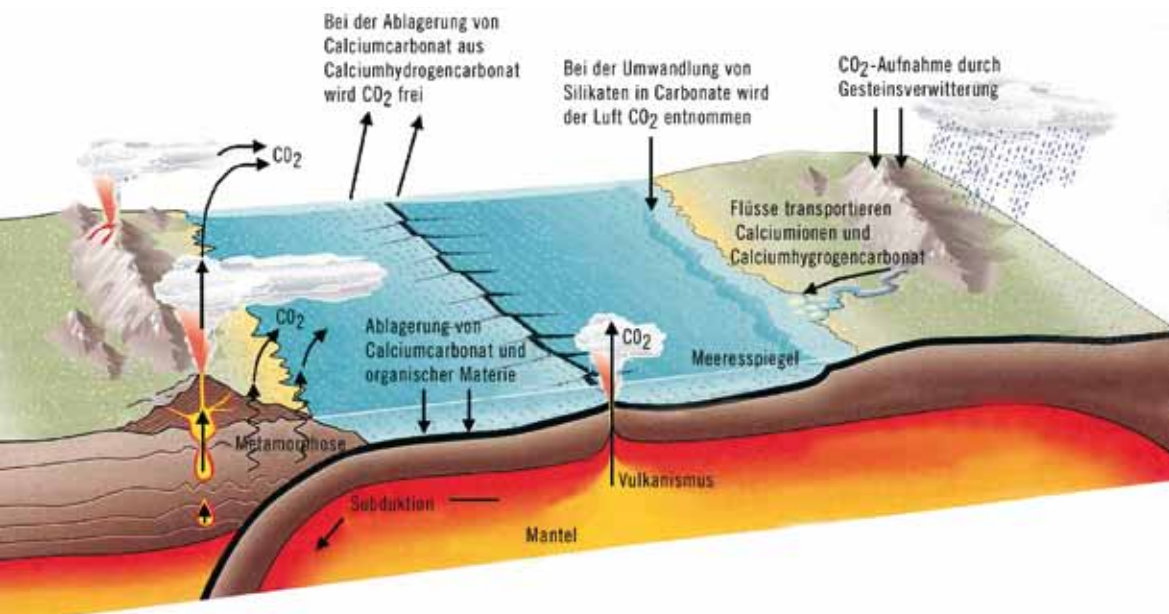


Mit diesem einfachen Mechanismus wird CO_2 der Atmosphäre entzogen und in Kalkablagerungen, etwa Korallenriffen, in den Meeren „entsorgt“. Diese Kalkablagerungen gelangen an den Subduktionszonen teils wieder in die Tiefe.

Würde dieser Prozess ständig ablaufen, verlöre die Atmosphäre wieder zu viel CO_2 (Runaway Icehouse). Zum Glück aber bringen Vulkane CO_2 zurück, das durch die hohe Temperatur in den Tiefen der Subduktionszonen frei geworden ist.

Die stete Verwitterung und Erosion der Gesteine führt zudem über Flüsse jede Menge gelöste chemische Elemente und Schwebstoffe mit sich. Diese „düngen“ die Ozeane mit Nährstoffen (Phosphat, Silikat, Eisen) und machen somit das marine Leben möglich.

Die Mineralogie ist wesentlich an der Bestimmung dieser Stoffkreisläufe beteiligt, sie untersucht die Gesteinsverwitterung im Detail und hilft, mit Isotopenmethoden das Klima der Vergangenheit zu rekonstruieren und Prognosen zur Klimaentwicklung zu festigen.

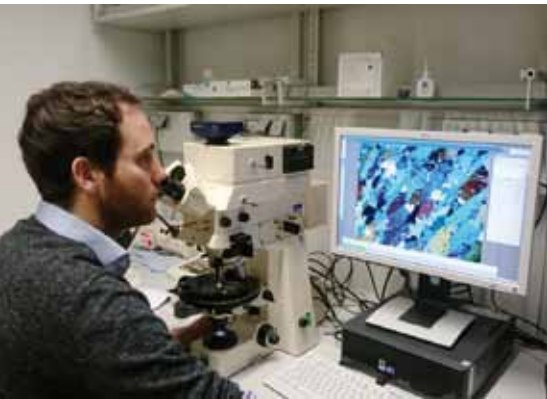


Vom Massenspektrometer zur Hochdruckpresse



Arbeiten unter Reinraum-Bedingungen

Polarisationsmikroskopie



European Synchrotron Radiation Facility, ESRF, in Grenoble - eine hervorragende Röntgenstrahlquelle für diffizile Untersuchungen

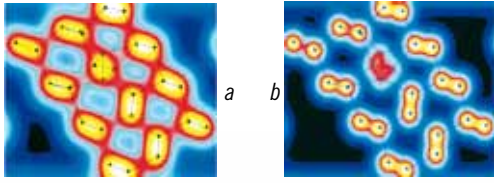


Die Entschlüsselung der Entstehungsprozesse von Gesteinen ist ein geradezu kriminalistisches Unterfangen, Spurensuche im wahrsten Sinne des Wortes.

Kleinste Einschlüsse von Mineralen in Meteoriten, haarfeine Entmischungslamellen in einem Mineral, feinste Äderchen einer zu Glas erstarrten Schmelze in einem Gestein sind häufig von ausschlaggebender Bedeutung. Die Identifizierung wenige Mikrometer großer Objekte, ihre chemische und isotopische Analyse, ihre kristallographische Charakterisierung gehören damit zu den elementaren Aufgaben von Mineralogen und Geochemikern, von Materialwissenschaftlern ganz allgemein. Hierzu steht ihnen heute ein großes und raffiniertes Instrumentarium zur Verfügung, das durch die teils üppige Ausstattung mit Computerleistung noch erheblich an Gebrauchswert gewonnen hat. Wichtige Fragen, die sich mit diesen Instrumenten beantworten lassen, sind: Welche chemischen Elemente haben sich in einer Probe in welcher Menge und welchen isotopischen Verhältnissen wie arrangiert?

Identifizierung und Charakterisierung von Mineralen

Zur ersten Ansprache von Mineralen, Erzen und Gesteinen im Gelände können Geowissenschaftler ganz einfache Hilfsmittel benutzen: Die Identifizierung von Mineralen über Kristallform und Farbe mittels Lupe, die Bestimmung der Ritzhärte mit dem Metall eines Hammers. Bei der Untersuchung eines Gesteins im Labor spielt das **Polarisationsmikroskop** eine zentrale Rolle, es kann das Gefüge der Mineralkörner in einem hauchdünnen Gesteinsdünnschliff sichtbar machen. Die Messung der Lichtbrechungseigenschaften der Mineralkörner mit Hilfe der Polarisationsoptik des Mikroskops ermöglicht eine sichere Bestimmung der Minerale. Für äußerst feinkörnige Substanzen ist die **Röntgendiffraktometrie** das Mittel der Wahl. Bei dieser Methode wird monochromatisches Röntgenlicht auf eine Probe gelenkt. Die Anordnung und Intensität der resultierenden Reflexe gibt Auskunft über die in der Probe vorhandenen Minerale und ihre Häufigkeit. Mineralogen benötigen außerdem detaillierte Kenntnisse über den strukturellen Aufbau von Mineralen. Mit der **Röntgen-Kristallstrukturanalyse**, die die Materialwissenschaft revolutioniert hat, kann der innere atomare Aufbau eines Kristalls ermittelt werden.



Rechnerische Simulation (a) und Beobachtung (b) eines Siliziumkristall-Defektes mit einem Elektronenmikroskop mit sub-atomarer Auflösung

Eine wichtige Rolle in Mineralogie und Kosmochemie spielt auch die Unterscheidung von zwei- und dreiwertigem Eisen mit Hilfe der **Möbbauserspektroskopie**. So sind bei der MER-Mission auf dem Mars zur Zeit zwei an der Universität Mainz gebaute Möbbausersonden im Einsatz, die vor Ort den Oxidationszustand des Eisens in Marsgesteinen bestimmen.

Chemische Analytik

Ohne die Entwicklung der **Röntgenfluoreszenz-Spektrometer** zu vollautomatischen Geräten, die in Minutenschnelle komplette Gesteinsanalysen liefern, wären die großen Erfolge bei der Aufklärung der Bildung magmatischer Gesteine völlig undenkbar. Das gilt noch mehr für die Sondenverfahren, die es gestatten, Punktanalysen mit hoher Genauigkeit durchzuführen.

In der **Elektronenstrahl-Mikrosonde** (s.S.16) wird ein mikrometerfein gebündelter Elektronenstrahl auf die Probe gelenkt und die dabei entstehende Röntgenstrahlung spektroskopisch analysiert. Durch das Abrastern der Probe lässt sich ein Bild von der Verteilung der chemischen Elemente gewinnen. Die Art der Minerale bleibt dabei im Dunkeln, so dass sich dieses Instrument sehr gut mit dem Polarisationsmikroskop ergänzt. Leider reicht die Nachweisempfindlichkeit der Mikrosonden für viele Elemente nicht aus, die in



Zirkon aus einem Alpengranit. Das Verhältnis von Uran- zu Bleiatomen verrät das Alter des Minerals.

Gesteinen in sehr geringen Konzentrationen auftreten (Spurenelemente), für die Geochemie dennoch von entscheidender Bedeutung sind.

Diese Lücke ist im letzten Jahrzehnt durch die **Laserablations-Massenspektrometrie** gefüllt worden, an deren Entwicklung Geochemiker maßgeblich beteiligt waren und noch sind. Bei diesem Verfahren wird eine Probe mittels eines gepulsten Laserstrahls punktwise verdampft und das Gas von einem **Massenspektrometer** analysiert, das auch die Isotopenverhältnisse der Elemente bestimmen kann. Damit besteht die Möglichkeit, die absolute Altersbestimmung eines winzigen Zirkonkristalls in einem Gesteinsdünnschliff durchzuführen. Im Falle des Zirkons macht sich der Geochronologe den zeitabhängigen Zerfall der Uranisotope ^{238}U und ^{235}U zunutze, bei dem die Bleiisotope ^{206}Pb und ^{207}Pb entstehen.

Ein Blick ins tiefe Innere der Erde

Ein wichtiges Glied in der Indizienkette zur Entschlüsselung der Entstehung von Mineralen und Gesteinen sind die Ergebnisse von Experimenten im Laboratorium, in dem Temperatur- und Druckbedingungen des Erdinneren simuliert werden. Relativ einfache Apparaturen sind Stempel-Zylinder-Pressen, die immerhin die Erzeugung von Drucken zulassen, die Erdtiefen von etwa 100 Kilometern entsprechen. Für die Erkundung des möglichen mineralischen Bestandes in den Tiefen des Erdmantels stehen mittlerweile tonnenschwere und beheizbare „Multi-Anvil“-Pressen zur Verfügung, die die Verhältnisse in größeren Tiefen simulieren. Höchste Drucke und Temperaturen sind in Diamantstempelzellen realisierbar, das Besondere: Man kann während des Experiments Reaktionen der Probe, zum Beispiel ihr Aufschmelzen, im Mikroskop beobachten.

Ein paar Details mehr: Spektroskopie für Mineralogen

Was ein Mineraloge alter Schule mit Mitteln, die in der Seitentasche eines Wanderrucksacks Platz finden, analytisch zuwege bringen kann, ist erstaunlich. Die moderne Technologie und Wissenschaft, an deren Zustandekommen die Mineralogie maßgeblich beteiligt war und ist, erfordert freilich aufwändigere Werkzeuge als Mineralogenhammer, Strichtafel und Salzsäure.

Für die strukturelle Mineralanalyse sind vor allem Geräte wichtig, die von Röntgenstrahlung Gebrauch machen, denn deren Wellenlänge liegt in einem Kristall großenteils in der Größenordnung des Abstands benachbarter Atome. Deshalb kann ein Kristall mit Röntgenstrahlung Beugungsmuster erzeugen, deren Analyse detailliert Auskunft über die Struktur des Kristalls gibt.

Mit energiereicher Röntgenstrahlung lässt sich auch das Elektronengerüst von Atomen so tiefgreifend stören, dass bei der Wiederherstellung des ungestörten Zustandes wieder Röntgenstrahlung auftritt, die charakteristische Informationen über die angeregten Atome und ihre Umgebung enthält, gleichsam einen energetischen Fingerabdruck, der die Elementidentifizierung ermöglicht. Energiereiche Elektronen führen ebenfalls zur Aussendung charakteristischer Röntgenstrahlung wie beim Arbeitspferd der Mineralogie, der Elektronenstrahl-Mikrosonde, die im Prinzip eine Weiterentwicklung des Rasterelektronenmikroskops ist.

Mineralogisches Arbeitspferd: Die Elektronenstrahl-Mikrosonde

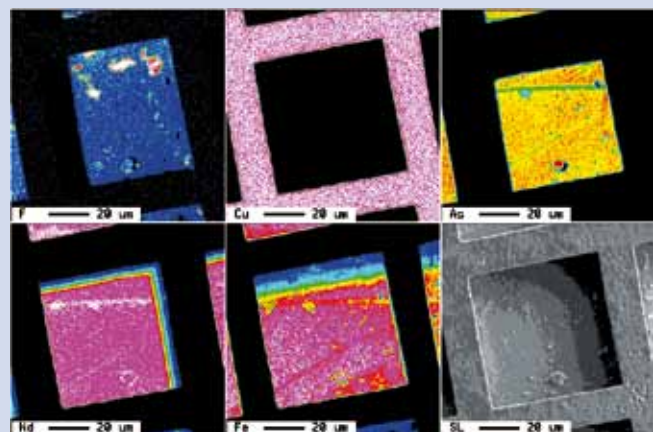
Das „Mikro“ bezieht sich auf den Brennfleck des Elektronenstrahls mit weniger als 1 µm Durchmesser. Die am Brennfleck emittierte Röntgenstrahlung kann mit zwei Methoden analysiert werden. Einmal energiedispersiv, wobei man sich den Umstand zunutze macht, dass die eintreffenden Röntgenquanten im Detektorkristall Elektronen-Loch-Paare erzeugen,

deren Zahl der Energie der Röntgenquanten proportional ist. Im Ergebnis gewinnt man Impulse, deren Höhe und Lage die schnelle Identifizierung und Quantifizierung eines Elements erlauben. Ein Nachteil der Methode: Die spektrale Auflösung ist eher bescheiden (< 130 eV).

Bei der wellenlängendispersiven Methode fällt das eintreffende Röntgenlicht auf einen verdrehbaren Analysatorkristall, der das Licht nach der Bragg'schen Reflexionsbedingung $2d \sin\theta = n\lambda$ entweder zu einem Proportionalzählrohr weiter leitet oder aussperrt. Die Auflösung dieses Verfahrens ist sehr viel höher (ca. 10 eV), teilweise erschließt sich, bei ordentlichem Aufwand, sogar die Röntgenfeinstruktur, die über die chemische Bindung eines Atoms Auskunft geben kann.

Während die energiedispersive Methode sehr schnell, also in wenigen Sekunden, Aufschluss über die in der Probe vorhandenen Elemente liefert, dauert die wellenlängendispersive Analyse etwas länger. Dafür bietet diese Methode aufgrund ihrer besseren Auflösung eine wesentlich bessere Unterscheidung zwischen den Elementen und, als weiteren Vorteil, den Nachweis von wenigen ppm (millionstel Teilchen) dieser Elemente.

Mikrosonden-Elementverteilungskarte eines supraleitenden Materials



Wenn der Elektronenstrahl über die untersuchte Probe fährt wie in einem Rasterelektronenmikroskop, lassen sich mit beiden Methoden Karten der Elementeverteilung anfertigen.



Das ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) arbeitet bei niedrigen Temperaturen mit einem Restdampfdruck, der kleine Objekte wie Käsemilben am Leben lässt. Mineralogen können das Wachstum von Mikrokristalliten bei der Zementerstarrung verfolgen und vieles andere mehr.

ESEM

Die übliche Elektronenstrahl-Mikrosonde erfordert bei elektrisch nicht leitenden Proben – im Regelfall die Mehrzahl – die Bedampfung der Probe mit einer leitenden Schicht, meist mit Kohlenstoff. Mit einem ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) kann man sich das sparen: An der Probenbühne lässt sich durch ein komplexes Vakuumsystem ein Restdampfdruck einstellen, der die Elektronen störungsfrei ableitet. Mit heiz- und kühlbaren Probenbühnen sind Kristallisationsvorgänge ebenso beobachtbar wie Korrosion; lebendes Gewebe, selbst kleine Organismen wie Käsemilben überstehen die Beobachtung weitgehend unbeschadet.

Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie

Röntgenfluoreszenzanalyse wird in vielen Varianten betrieben. Bei der gängigsten werden Tabletten aus gepresstem oder erschmolzenem Pulver einer Röntgenstrahlung ausgesetzt, die in den Atomen der Probe wiederum elementspezifische Röntgenfluoreszenz auslöst. Deren Analyse gibt eine schnelle und zuverlässige Auskunft über die elementare Zusammensetzung der Probe. Das Verfahren findet in der Industrie bei der Produktions- und Qualitätssicherung eine breite Anwendung. Mittlerweile sind auch Handgeräte verfügbar, deren Technik auf dem Mars wie auf dem Schrottplatz nützlich ist.

3D-Röntgenfluoreszenz-Mikroanalyse

Eine an der Berliner TU entwickelte Variante der konventionellen Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie dringt mit speziellen Röntgenoptiken in Mikrometerschritten in Proben ein und kann so beispielsweise den Zustand alter Dokumente unter ihrer Oberfläche – den Grad des Zerfalls oder ihre Echtheit – bestimmen.

Hyperspektralanalyse

Auch die klassische Spektroskopie im sichtbaren Licht und dessen Randgebieten hat sich weiterentwickelt. Die gleiche Technologie, mit der die abbildenden Chips für Digitalkameras gefertigt werden, ermöglicht auch die Fertigung preiswerter Analysechips, die Pixel für Pixel weite Wellenlängenbereiche etwa beim Überflug eines Prospektionsgebietes zu bestimmen gestatten. Die dabei anfallenden großen Datenmengen werden von einzelnen Arbeitsgruppen mit der Hilfe von Expertensystemen ausgewertet. Das deutsche Projekt REEMAP sieht die hyperspektrale Exploration von Elementen wie Indium vor, das für hochtechnologische Applikationen wie supraleitende Magnete oder Solarzellen gebraucht wird.

Raman-Spektroskopie

Der Raman-Effekt wurde nach der Vorhersage von A. Smekal (1923) durch Chandrasekhara Venkata Raman und anderen 1928 experimentell nachgewiesen. Raman bekam 1930 dafür den Nobelpreis für Physik und der Effekt seinen Namen.

Der Raman-Effekt lässt sich nachweisen, wenn Licht ein für dessen Wellenlänge optisch transparentes Medium durchquert. Der größte Teil des Lichtes passiert ungestört; ein kleiner aber kollidiert inelastisch mit der Materie und verändert deren Schwingungszustand durch Energieaufnahme oder –abgabe. Mit entsprechend veränderten Wellenlängen verlässt das kollidierte Licht – etwa ein Zehnmillionstel der ursprünglichen Intensität – den Reaktionsort. Die in der Regel zahlreichen und stoffspezifischen Anregungsmöglichkeiten schlagen sich dann in einem Spektrographen in einem Linienspektrum nieder, in einer Art charakteristischem Fingerabdruck, der sogar Substanzen mit der gleichen elementaren Zusammensetzung aber verschiedener Struktur auseinander zu halten erlaubt.

Die sich nach der Entdeckung des Effektes entwickelnde Raman-Spektroskopie wurde bald nach ihrer Entwicklung von der Infrarot-Spektroskopie als Routinemethode verdrängt. Das änderte sich, als kompakte, preiswerte Laser auf den Markt kamen, die Lichtdetektoren besser und billiger wurden und Rechenpower ubiquitär geworden war.

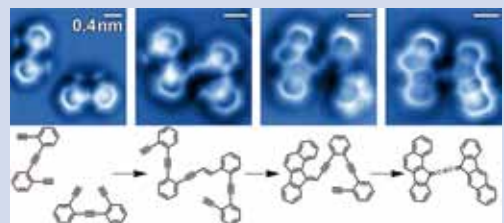
Heute hat auch die Vernetzung ein hohes Niveau erreicht und es zeichnet sich ab, dass die Raman-Spektroskopie zur Methode der Wahl bei der Identifizierung von Mineralen wird, deren Raman-Spektren in einer Datenbank abgelegt worden sind. Ein wichtiger Impuls kam aus der Raumfahrt, die Bedarf für ein miniaturisiertes Raman-Spektrometer anmeldete – die Größe schrumpfte vom Tischformat auf das eines Taschenbuches. Die umfassend angelegte Spektren-Datenbank RRUFF wird – teils privat gesponsert – von der University of Arizona gepflegt.

Die Entwicklung ist nicht auf Minerale beschränkt, Raman ist für ein großes Stoffspektrum geeignet und

beginnt auch, in der zivilen Sicherheitstechnik eine Rolle zu spielen, weil mobile Handgeräte in Sekundenschnelle gefährliche Stoffe detektieren können. Schönes Beispiel: Eine verbreitete Whiskeymarke enthält laut Raman Methanol.

Rastersonden

Bei vielen Körpern der technischen Mineralogie – wie Mikrokristalliten für die Katalyse – ist deren Oberfläche am wichtigsten, weil sich die zu nutzenden Prozesse auf ihr abspielen. Es gibt mittlerweile zahlreiche Spektroskopieverfahren, die Oberflächen charakterisieren können, besonders augenfällig sind aber die Rastersondenverfahren, darunter besonders die Rasterkraftmikroskopie. Bei der wird eine Prüfspitze, ggf. ein einzelnes Molekül, in so feinen Schritten auf ein Objekt zu bewegt, dass es die – absolut gesehen – winzigen Kräfte bestimmen kann, die ein Molekül erfährt, wenn es sich einem zweiten nähert. Beim Abrastern der Objektfläche und gleichzeitiger Registrierung der Distanzregelspannung lässt sich dann ein Bild mit milliardenfacher Vergrößerung gewinnen, das das Benzolmolekül so zeigt, wie Kekulé es sich vorgestellt hatte, als sechszähligen Ring. Die Technik wird noch wichtige neue Synthesemöglichkeiten zeigen, etwa durch die detaillierte Aufklärung der katalytischen Wirkung mineralischer/metallischer Oberflächen.



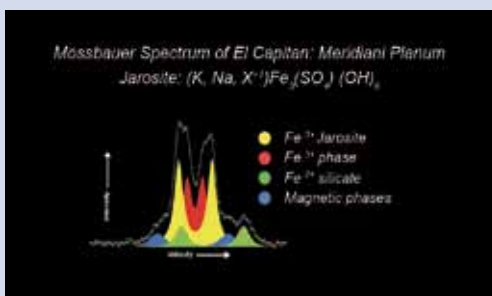
Wie im Lehrbuch gezeichnet: In einer aktuellen Studie haben Forscher die Zwischenschritte einer mehrstufigen Reaktionskaskade von Endrin-Molekülen an einer Silberoberfläche mittels Rasterkraftmikroskopie sichtbar machen können. Für diese Messungen wurde die AFM-Spitze mit einem Kohlenmonoxid-Molekül funktionalisiert, um eine besonders hohe Auflösung zu erzielen. Untersuchungen wie diese sind für die Katalyseforschung auch an mineralischen Oberflächen von großem Wert.

Mößbauer-Spektroskopie

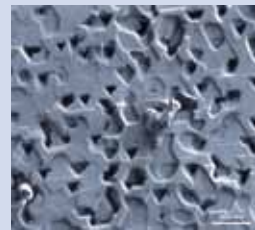
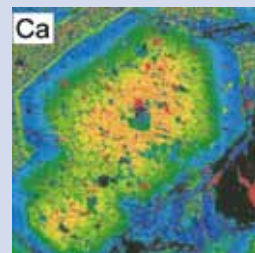
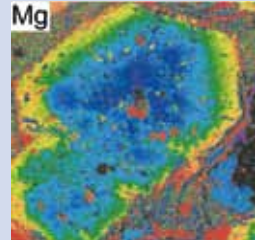
Für die Entdeckung des Mößbauer-Effektes, fachsprachlich die rückstoßfreie Kernresonanzabsorption von Gammastrahlung durch Atomkerne, erhielt Rudolf Mößbauer 1961 den Nobelpreis für Physik. Als spektroskopische Methode weiter entwickelt, hat der Effekt wichtige Beiträge zur Aufklärung von Oxidationszahlen, Bindungssymmetrien und magnetischen Strukturen in vielen kristallinen und amorphen Festkörpern geleistet.

Viele Elemente zeigen den Mößbauereffekt, in der Praxis finden aber nur wenige Verwendung. Das beliebteste Element ist Eisen. Die Quelle für die Eisen-Gammastrahlung ist dessen radioaktives Elternnuklid Cobalt-57, das so auf einer beweglichen Bühne befestigt wird, dass die Bewegung durch den Dopplereffekt die Gammastrahlungsenergie moduliert. Ein Mößbauerspektrometer ist einfach und billig; benötigt wird nur ein Probenhalter, ein Detektor und eine bewegliche Strahlungsquelle. Wenn die Energie der eintreffenden Gammastrahlung exakt der Absorptionsenergie der Probe entspricht, tritt eine Resonanz auf, ähnlich der akustischen Resonanz zwischen zwei Stimmgabeln mit gleicher Eigenfrequenz. Die Mößbauerspektroskopie ist außerordentlich empfindlich und erlaubt daher den Nachweis kleinster Änderungen in der atomaren Nachbarschaft der detektierten Eisenatome.

In Mößbauerspektren lassen sich viele verschiedene Eisenverbindungen eindeutig identifizieren. Das Spektrometer kann direkt auf die Probe aufgesetzt werden und eine zerstörungsfreie Analyse durchführen. So hofft man, mit guten Gründen, ein mineralogisches Gedächtnis für Wasser auf dem Mars rekonstruieren zu können.

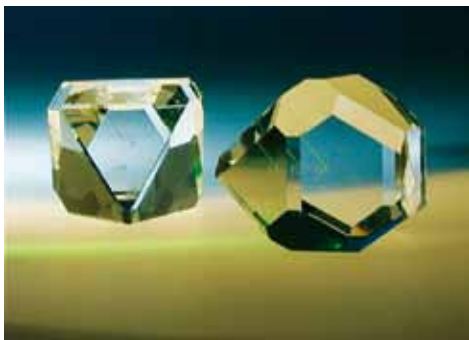


- von oben:
 1: Punktanalyse mit Laserablation und Massenspektroskopie;
 2, 3: Elementverteilung mit der Mikrosonde;
 4: Geätzte Silizium-Einkristallfläche im Raster-Elektronenmikroskop;
 5: Lanthanarbonat-Mikrokristalle;
 6: Kristallwachstum im atomaren Maßstab, Rastertunnelmikroskop;
 7: Diamant-Zwilling



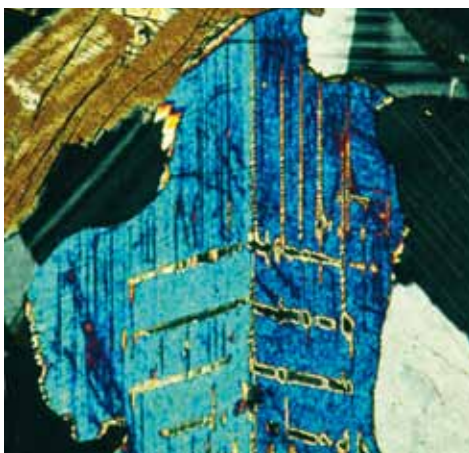
Mößbauer auf dem Mars – identifiziert nicht nur Elemente, sondern auch deren Verbindungen. Das Mineral Jarosit entsteht auf der Erde nur, wenn Wasser da ist, also wird es auch auf dem Mars Wasser gegeben haben.

Kristalline Geheimnisse



Kalialaun-Kristalle, frei in wässriger Lösung gewachsen

Kristalle haben mit ihrer Regelmäßigkeit und gelegentlichen Farbenpracht immer schon die Menschen gefesselt. Die wissenschaftliche Analyse der kristallinen Eigenarten hat die Grundlage für die meisten modernen Industrien geschaffen.



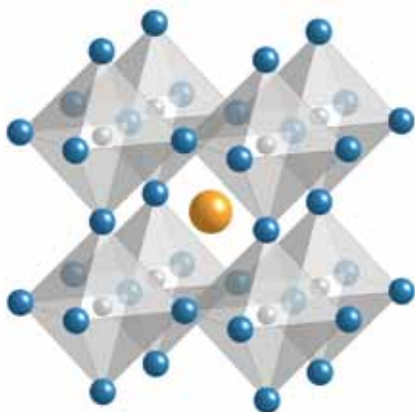
Gesteinsdünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop, Zwillingsskristall

Die äußere Form

Die detaillierte Registrierung bestimmter geometrischer Eigenheiten der Kristallform eines Minerals war früher ein wichtiges Instrument für dessen Identifizierung; die Methodik hatte unter anderem zur Folge, dass Mineralogen schon „in Atomen dachten“, als die atomare Zusammensetzung der Materie noch nicht bewiesen war: Die Kristallformen ließen sich deuten und schematisieren, wenn man sich die Kristalle aus sauber gestapelten Elementarbausteinen zusammengesetzt dachte, Atomen eben.

Innere Werte: Kristalloptik

Die Wechselwirkung von Licht mit Kristallen ist so reich an Details, dass kristalloptische Methoden bis heute einen hohen Stellenwert haben. Allein mit einem guten optischen Mikroskop, das durch wenige bezahlbare Zusätze zu einem Polarisationsmikroskop ausgebaut worden ist, können Minerale in Gesteinsdünnschliffen sicher identifiziert werden.



Anordnung der Atome in der Perowskit-Struktur

Röntgenkristallstrukturanalyse

Als 1912 unter der Leitung Max von Laues das erste Beugungsdiagramm von Röntgenlicht an einem Kristall entstand, waren sowohl die elektromagnetische Natur des Röntgenlichtes wie auch der atomare Aufbau von Kristallen und damit der Materie bewiesen. Zugleich war der Grundstein für die Aufklärung der atomaren Struktur von Kristallen gelegt. Im Folgenden wurden eine Unzahl von Strukturen aufgeklärt, deren berühmteste die der Doppelhelix ist, der DNA, des Moleküls des Lebens. Mineralogisches Gedankengut war an diesem „irren Unternehmen“ (Crick, Franklin, Watson) maßgeblich beteiligt. Moderne Computerprogramme haben die Kristallstrukturbestimmung deutlich vereinfacht, weshalb fortlaufend komplexere Strukturen in Angriff genommen werden, wodurch dieser Zweig immer noch für Nobelpreise gut ist.

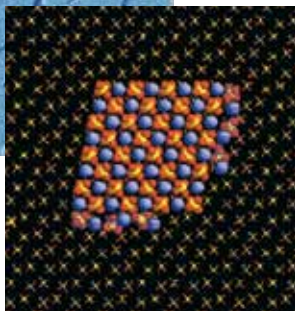
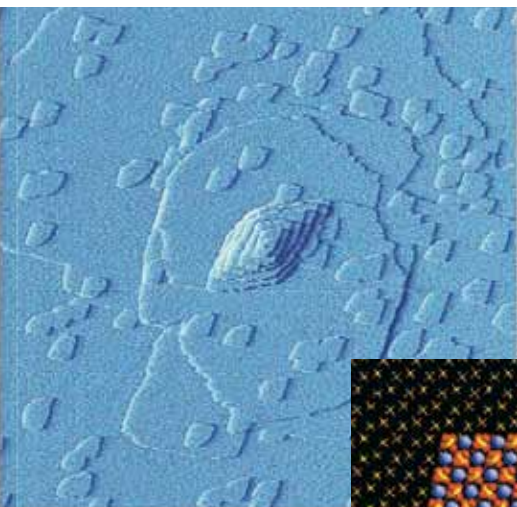
Röntgenlaser European XFEL, DESY in Hamburg



Kristallwachstum und -züchtung

Mineraloberflächen

Wenn Minerale mit ihrer Umwelt reagieren, dann ist deren äußere Grenzfläche aktiv. In den oberflächennahen Regionen der Erde bestimmen Milliarden Quadratkilometer Mineraloberflächen die physikochemischen Reaktionen, die unsere Umwelt prägen und mit deren Hilfe sich das



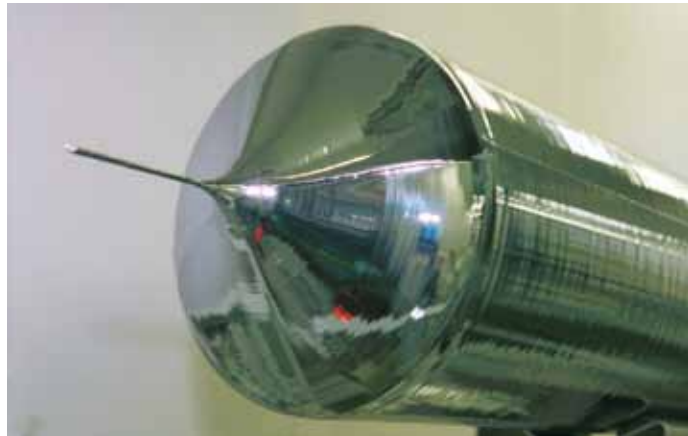
Rastersondenbild einer Baryt-Oberfläche in übersättigter Lösung. Man erkennt molekulare Stufen mit einer Höhe von 0,35 nm, was einer BaSO₄-Schicht in der Barytstruktur entspricht.

Insert: Computersimulation zur Bildung 2-dimensionaler Keime auf einer Barytoberfläche

Leben seine mineralischen Notwendigkeiten beschafft. Detailkenntnisse zu mineralischen Oberflächen sind aber auch technisch und medizinisch von großem Interesse, wenn etwa das Wachstum von Nierensteinen verhindert oder - bei der Kristallzüchtung - das Wachstum der gewünschten Kristallformen gefördert werden soll. Neue Instrumente wie die **Rastersondenmikroskope** ermöglichen heute die unmittelbare Abbildung der Kristallwachstumsprozesse und so eine immer genauere Wachstumssteuerung.

Silizium – ein Kristall mit Karriere

Große, bis zu 250 kg schwere Kristalle aus hochreinem Silizium sind heute die Stars unter den von Menschen hergestellten „Steinen“. Der Wert aller



Silizium-Einkristalle zur Waferherstellung können heute mit 300 mm Durchmesser hergestellt werden.

Produkte, an denen dieser „Stein der Weisen“ als Träger für Elektronik aller Art einen Anteil hat, beläuft sich auf ungefähr eine Billion Euro.

Perfekte Kristalle für UV-Optiken

Es sind dünne, polierte Scheiben eines Siliziumeinkristalls, Wafer, die mit lithographischen Techniken die Strukturen hunderter Computerchips eingepägt bekommen. Diese Strukturen können umso feiner sein, je kürzer die Wellenlänge der Belichtungsquelle ist. Für die Lithographie der nächsten Chipgeneration ist UV-Laserlicht mit einer Wellenlänge von 157 nm vorgesehen, für das die herkömmlichen Optiken nicht mehr transparent sind. Optiken aus Calciumfluorid-Kristallen, Flussspat, aber lassen dieses UV-Licht durch.

Mittlerweile hat sich die Lithografie auf Spiegeloptiken konzentriert, Optiken aus Flussspat aber könnten in der Chipproduktion eine zweite Chance bekommen.

Optiken aus Flussspat



Materialien der Angewandten Mineralogie

Eigentlich ist schon das erste Steinbeil einer Art Mineralogie zu verdanken. Neben den Brucheigenschaften des Minerals Feuerstein mussten auch die Lagerstätten bekannt sein. Die Verwendung von Materialien hat die Geschichte der Menschen so stark bestimmt, dass Epochen nach ihnen benannt wurden: Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit ... Das heute verfügbare große Spektrum von Werkstoffen ist eine wichtige Grundlage für die soziale, kulturelle und wirtschaftliche Entwicklung der Gesellschaft. Neue Werkstoffe werden heute überwiegend auf ein vorgegebenes Anwendungsprofil zugeschnitten. Dabei steht eine nachhaltige Entwicklung im Vordergrund.

Baustoffe gestern und heute

Schon die Römer nutzten einen Zement, der mit heutigen Produkten durchaus vergleichbar ist. Ausgangsstoffe dazu waren vulkanische Aschen, die mit gebranntem Kalk optimiert wurden. Die modernen Hightech-Produkte unseres Alltags allerdings sind im Detail hochspezialisiert. Die Erforschung von Hydratation, Abbindeverhalten und Festigkeit von Beton und hydraulischen Baustoffen sind Gegenstand ausgedehnter Forschungen, an denen auch und gerade Mineralogen beteiligt sind.

Die stetige Verbesserung der Baustoffe setzt detaillierte Charakterisierungen und Untersuchungen „in situ“ (lat.: „am Ort des Geschehens“) voraus. Viele Baustoffreaktionen lassen sich heute „live“ im ESEM beobachten, im Environmental Scanning Electron Microscope. Dieses spezielle Rasterelektronenmikroskop lässt am Ort der Probe noch genug Luftdruck und Feuchtigkeit zu, um Kristalle aus einem wässrigen Gemenge von frisch angesetztem Beton wachsen zu lassen. Die Wirkung von Zusatzstoffen auf die Kristallisation und das Mikrogefüge von Beton & Co. lässt sich so unmittelbar verfolgen.

Die Kinetik der mineralbildenden Prozesse in hydrothermalen Baustoffen wird „in situ“ mit Hilfe von Neutronen an Hochfluss-Reaktoren untersucht. Mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute kann das Wachstum von Zementmineralen bestimmt und quantitativ beschrieben werden.



Natriumsulfat in Porenbeton, ESEM-Elektronenmikroskop



Diamantskalpelle

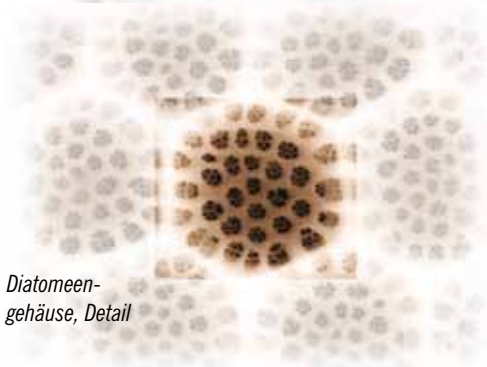
Biomineralisation

Industriekeramiken sollen künftig immer raffinierter werden. Auf der Suche nach neuen Materialien geht die Angewandte Mineralogie den Tricks der Natur auf den Grund.

Seeigel etwa synthetisieren 30 cm lange Stachel aus sprödem Calcit, die im reinen Zustand bei der geringsten Belastung brechen würden. Mit geringen Anteilen von Polymeren im Bereich weniger Prozent werden die Stacheln biegsam und halten heftiger Brandung stand. Plättchen aus Ara-

gonit, einer Variante des Calcits, verklebt mit Spuren von Polymeren, machen das schimmernde Perlmutter aus, das dreitausendmal bruchzäher ist als das reine Mineral.

In drei Dimensionen verflochtene keramische Fasern gelten als Nonplusultra der Technik; es gibt Lebewesen, die derlei routiniert beherrschen: Der Zahnschmelz der Wühlmaus wird auf diese Weise sehr bruchfest gemacht und hat dem Tier in der Evolution zu einem entscheidenden Vorsprung geholfen.

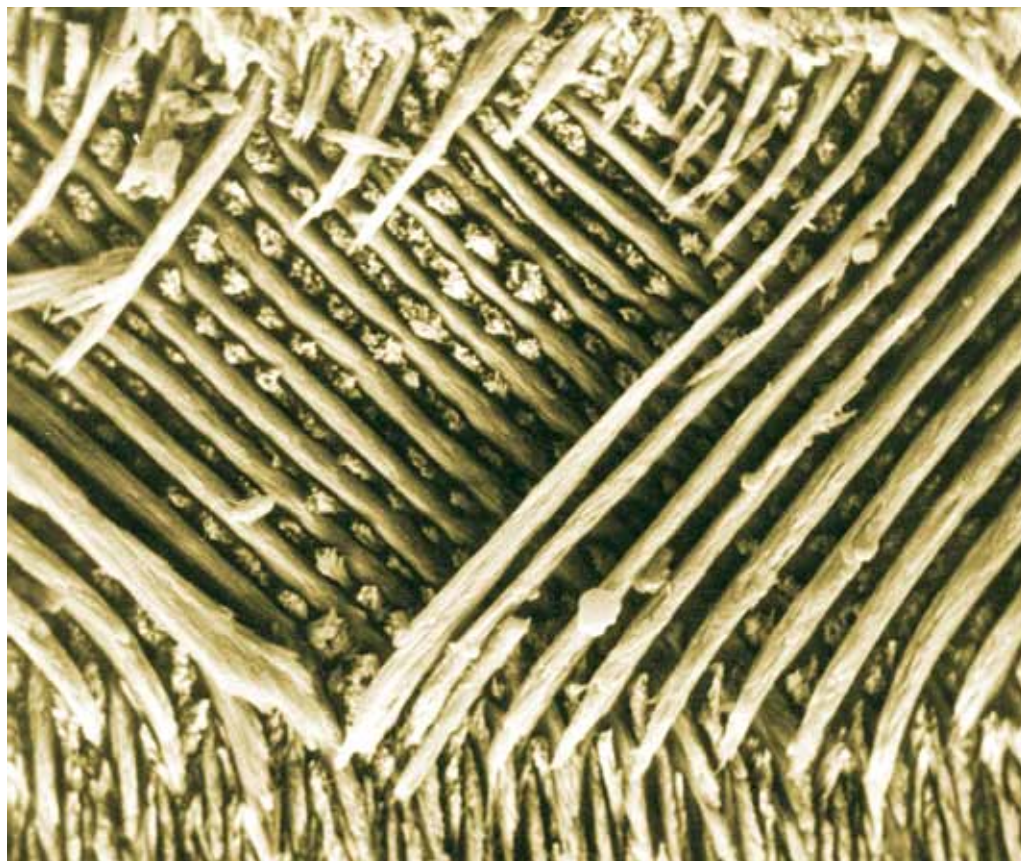


Diatomeengehäuse, Detail



Hintergrund: Perlmutter-Gehäuse einer Kegelschnecke

3D-verstärkte Faserkeramik im Wühlmauszahnschmelz



Hightech-Keramik

Vom Sauschwanzfadenführer zum Supraleiter – wie ein Angehöriger des mittleren Managements dieser Tage auf einer Reise von New York nach Essen mit Hightech-Keramik in Berührung kommen könnte.

Er könnte einen täuschend natürlich wirkenden Zahnersatz aus Zirkonoxid haben und ein künstliches Hüftgelenk mit einem Kugelkopf aus Aluminiumoxid; Manschettenknöpfe mit (dezenten) synthetischen Rubinen tragen (ebenfalls Aluminiumoxid, wie auch die natürlichen, nur mit etwas Chrom). Die Einzelfäden des Garns seines Anzugs sind reibungsarm von keramischen Sauschwanzfadenführern zum Garn vereint worden. Das Glas seiner Armbanduhr besteht aus kratzfestem Saphir (schon wieder Aluminiumoxid). Eigentlich Korund, aber das klingt zu billig, schließlich gibt es Korund-Schleifpapier.



Die Fadenführungen moderner Textilmaschinen – die Sauschwänze (ein Fachbegriff) sind unschwer zu erkennen – werden von schnellen Fäden extrem beansprucht; der Werkstoff Keramik aber schafft das, härter als beinhart, glatter als aalglat. Hier: Aluminiumoxid.

Der Grund für den New York-Besuch unseres Modellmanagers war ein Treffen zur Erinnerung an die denkwürdige Tagung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft 1986, bei der Georg Bednorz und Alex Müller die Substanz Lanthan-Barium-Kupferoxid ($\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$) vorstellten, einen Supraleiter mit einer Sprungtemperatur von 35 Kelvin – eine Sensation, für die es schon im Jahr darauf den Nobelpreis für Physik gab. Der Ruhm fällt eindeutig



Künstliche Hüftgelenkkugel aus Aluminiumoxid-Keramik

auch auf die Mineralogie, weil Bednorz die Eingangsklausuren zum chemischen Einführungspraktikum nicht bestanden hatte und deshalb zur Mineralogie wechselte, wo er zweifellos die Substanzklasse der Perowskite kennen lernte, eben jene, die ihm zum Ruhm verhelfen sollte.

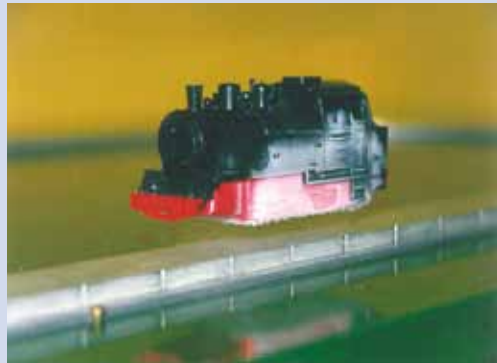
Das Flugzeug nach Deutschland hätte sich nie in Bewegung gesetzt ohne die von Mineralogen (und Kristallographen und Chemikern und Physikern) perfektionierten Siliziumkristalle für Computerchips, in die sich Rechentechnik *en masse* ablegen ließ, auch

Leitende SiC-Keramik aus Nanopartikeln



solche zur automatischen Steuerung des Flugzeugs. Erwähnenswert, dass auch die Antriebstechnik mineralogisches Knowhow enthält, in der Gestalt von Turbinenschaufelkomponenten aus Siliziumnitrid, die höhere Betriebstemperaturen gestatten und damit einhergehend einen geringeren Kerosinverbrauch.

Vom Flughafen Köln/Bonn aus geht es weiter mit der Bahn. Auch der ICE ist mit Keramik ausgestattet, die Bremsen sind aus faserverstärktem Siliciumcarbid, SiC.



*Schwebende Spielzeuggbahn
dank Hochtemperatur-Supraleiter*



Test bestanden: Das keramische Supraleiterkabel am Umspannwerk Herkulesstraße in Essen hat über eine Rekordstrecke von einem Kilometer das Fünffache des herkömmlichen Stroms geleitet – fehlerfrei.

Schließlich Essen. Der Ort hat in der Energiebranche ein starkes Zeichen gesetzt, in seiner Innenstadt ist ein Testkabel mit einem Hochtemperatursupraleiter verlegt worden, der das Fünffache dessen an Strom transportieren kann, was eine herkömmliche Leitung bringt. Zwar muss der Supraleiter auf die Temperatur flüssigen Stickstoffs gekühlt werden, dafür fallen im Supraleiter keine Wärmeverluste an, auch sendet er keine möglicherweise störenden magnetischen

Wechselfelder aus und Umspannstationen können eingespart werden ... das Projekt AmpaCity, privat wie öffentlich gefördert, verspricht viel.

Gut möglich, dass eine weitere wichtige Facette der Energietechnik ebenfalls von Mineralogen (und Kristallographen und Chemikern und Physikern) befeuert wird: Die Thermoelektrik, die Umwandlung von Wärmeflüssen in einem speziellen Festkörper in elektrische Spannung und schließlich Stromflüsse, und umgekehrt. Die Stoffgruppe der Clathrate mit Käfigstrukturen, in die einzelne bewegliche Atome gesperrt werden können, zeigt Rekordwerte.

Mineralogie und Geochemie in der Umwelt- und Klimaforschung

Die moderne Industriegesellschaft setzt gewaltige Mengen an Schadstoffen in die Umwelt frei. Mineralogen sind nicht nur dabei, wenn es gilt, toxische Substanzen aufzufinden und auf sichere Weise zu entsorgen. Sie helfen, schädliche Substanzen gar nicht erst entstehen zu lassen.



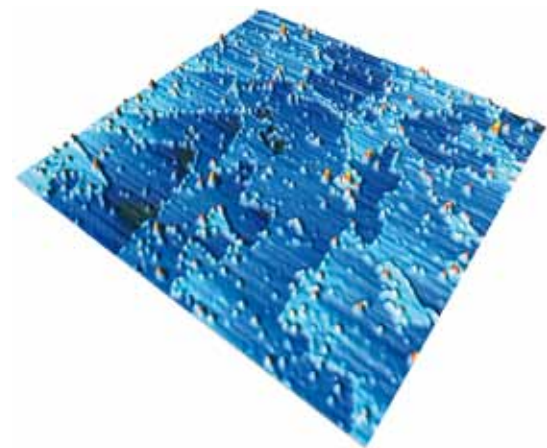
Messung des pH-Wertes in eisenreichen, sauren Minenwässern unterhalb einer Abraumhalde in Kristineberg, Schweden

Mit dem Wissen der Umweltmineralogie können Rückstände, Rest- und Abfallstoffe aufbereitet und recycelt werden. Die Umweltmineralogie untersucht das Langzeitverhalten mineralischer Phasen für verlässliche Deponietechniken, saniert die Wassergewinnung mit Hilfe von Mineralen und hält Minerale zur Immobilisierung von Schadstoffen bereit. So können sogenannte CSH-Phasen aus Calcium, Silizium und Wasser Chloride binden; Calcit, Aragonit, Perowskit u.a. Schwermetalle festhalten, indem sie sie an sich binden etc. Quarzsand hilft bei der Wirbelschichtverbrennung von Kohle, die Wärmeübertragung und damit den Wirkungsgrad zu verbessern; Tonminerale dichten Deponien ab. Vielleicht am wichtigsten: Die Mineralogie kann helfen, Techniken zu entwickeln, die Schadstoffe erst gar nicht entstehen lassen. So wird der „Stein der Weisen“ – hochreines kristallines, dotiertes Silizium – in der Form von Solarstrom künftig wesentliche Beiträge zu einer sauberen Energieversorgung leisten können.

Die Analyse von Stoffströmen, insbesondere der Bewegung von Schadstoffen, ist ein weiteres Betätigungsfeld für Mineralogen. Das Instrumentarium hierfür wird immer empfindlicher und ermöglicht immer häufiger „mineralogische Fingerabdrücke“, hochgenaue Stoffanalysen, die die Herkunft von Schadstoffemissionen belegen.

So galt die Elbe lange als eines der schmutzigsten Gewässer Mitteleuropas. Doch Sanierungsmaßnahmen der letzten Jahrzehnte haben sichtlich Erfolg gehabt: die Mengen an Schwermetallen im Schlamm am Grunde des Flusses haben sich bereits halbiert.

Die Analysen zeigen auch, dass Umweltsünden schon Sache der Altvorderen waren, die Analyse Schicht um Schicht etwa des Bleigehalts eines Hochmoores weist die Römer als Verschmutzer durch Bleibergbau aus. Sie werden freilich weit in den Schatten gestellt durch die – inzwischen bleifreie – Treibstoffindustrie. Woher wissen wir übrigens, dass die Römer die Blei-Verschmutzer waren? Die Blei-Isotopenmessung im Massenspektrometer überführt die Täter: Das



Die Nanotopographie von Schichtsilikatoberflächen ist durch molekulare Stufen mit einer Höhe von 1,0 Nanometer charakterisiert (Bildausschnitt: 800 x 800 Nanometer). Kolloidale Eisenpartikel haben sich heterogen auf der Oberfläche gebildet und Arsen eines kontaminierten Grundwassers immobilisiert.



Aufbringen von Aufbereitungsrückständen der Kupfer-, Nickel- und Kobaltmine in Selebi-Phikwe, Botswana

$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ Isotopenverhältnis war charakteristisch für das von den Römern verhüttete Blei.

Wenn Mineralogen die Nähe der Biologie suchen, interessieren sie sich nicht nur dafür, wie Schnecken sich in Schale werfen; viele Mikroorganismen sind in der Lage, mit und von chemischen Reaktionen zu leben, die auch für die Mineralbildung bzw. deren Auflösung wichtig sind. Wenn Wasser gegenwärtig ist, können etwa zentimeterdicke Matten von Bakterien von der Oxidation des Eisens im Pyrit leben und das dabei entstehende extrem saure Milieu tolerieren. Andere Bakterien bilden Biofilme, die mit großer Effizienz Zink, Blei, Arsen, Selen und mehr aus den Abwässern von Minen in abfiltrierbare Kristalle einbinden.

Was hat die zu Beginn der 90er Jahre entwickelte Rastersondenmikroskopie mit Grundwasser zu tun? Die Methode macht Mineraloberflächen im molekularen Maßstab unter umweltrelevanten Bedingungen sichtbar. Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich etwa mit der Untersuchung von Mineralbildungen und der Immobilisierung anorganischer Schadstoffe (Mischphasen, Speicherminerale) die z. B. unmittelbar mit der Trinkwasserqualität verbunden sind. Nanoskalige Tonpartikel und andere kolloidale Grundwasserkomponenten können damit praxistgerecht analysiert werden. In der Rastersondenmikroskopie-Abbildung wird z. B. gezeigt, wie sich Arsen aus Grundwasser an Eisenpartikeln festsetzt. Die Eisenpartikel wiederum lagern sich an Tonminerale an. Ausgerechnet das Grundwasser von Bangladesh, neu erschlossene Trinkwasserquelle für die ständig wachsende Bevölkerung, ist schwer mit (natürlichem) Arsen belastet. Das Leben von 270.000 Menschen ist so bedroht.

Trotz der Konsensvereinbarung zur Beendigung der Nutzung der Kernenergie in Deutschland müssen radioaktive Abfälle über einen Zeitraum von etwa 1 Million Jahre sicher gelagert werden. Dies erfordert anwendungsorientierte mineralogisch-geochemische Grundlagenforschung zur Wechselwirkung von Radionukliden und Mineralen. So sind am Forschungszentrum Karlsruhe u.a. Immobilisierungstechniken für langlebige Radionuklide durch Verglasung und den Einschluß in neuartige Wirtsmminerale entwickelt worden.

Aber ebenso wichtig ist die sichere Lagerung nicht-radioaktiver Problemabfälle, die ein 40 mal so großes Volumen einnehmen. Auch hier ist die Mineralogie bei der langfristigen Immobilisierung und Isolierung von Nutzen.

Bohrung auf der Halde mit Aufbereitungsrückständen der Cu-, Ni- und Co-Mine in Selebi-Phikwe, Botswana.



Mineralogie im Anthropozän

Das geologische Zeitalter der Gegenwart hat den Namen Holozän und bezeichnet die – mit Unterbrechungen – ausgedehnte Warmzeit der letzten 11.000 Jahre. Die alles in allem günstigen Klimaverhältnisse werden als ein wichtiger Grund für die Entstehung der menschlichen Hochkulturen und damit der Technologie angenommen. Die hat mittlerweile einen Umfang erreicht, der in den Bohrkernen von Eis und Sedimenten klare, dauerhafte Spuren hinterlässt und damit die Möglichkeit, ein neues Erdzeitalter zu definieren, das Anthropozän. Tatsächlich übersteigt die Masse der von Menschen umgesetzten Materie heute die von Wind und Wasser bewegte.

Beispiel Beton: Das von den Römern erfundene Material ist im 20. Jahrhundert zum bevorzugten Baustoff geworden, mittlerweile sind rund 50 Milliarden Tonnen davon produziert worden – genug, um jeden Quadratmeter Festland mit fast einem Kilogramm Beton zu bedecken. An Plastik werden jährlich 500 Millionen Tonnen produziert. Kunstdünger verändert im großen Stil die Verteilung von Phosphor im Boden; die Menge an bioverfügbarem Stickstoff hat sich im Vergleich zum Holozän mehr als verdoppelt. Alles das werden die Geologen und Mineralogen der fernen Zukunft aus ihren Daten ablesen können, Zeugnisse eines vom Menschen stark mitbestimmten Erdzeitalters, des Anthropozäns. Der Begriff erfährt durchaus Kritik, manchen gilt er als Ausdruck einer Allmachtsphantasie, seiner Formulierung aber liegen gleichermaßen Ohnmachtsängste zugrunde. Deshalb ist die Frage legitim: Sollte nicht die Realisierbarkeit von Maßnahmen kritisch geprüft werden, katastrophalen Trends wie einer massiven Klimaveränderung auch

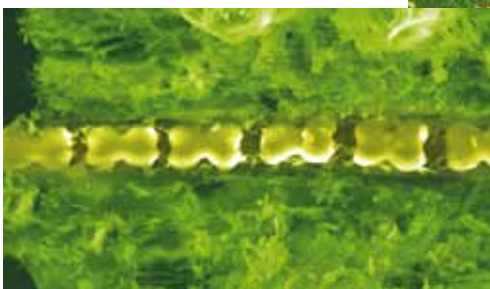
technisch zu begegnen? Die Mineralogie könnte hierzu sicherlich Beiträge leisten, immerhin beruht der über große Zeiträume wirksame Erdthermostat (s. S. 13) auf mineralogischen Zusammenhängen. Leider ist der Mechanismus, der die Weißen Klippen von Dover (größtenteils Calciumkarbonat) entstehen ließ, für den heutigen CO₂-Impuls zu langsam.

Die konventionellen Techniken für die Speicherung von anthropogenem CO₂ zur Abschwächung des erwarteten Treibhauseffektes sind aufwändig und teuer und es darf aufgrund einschlägiger Erfahrungen bezweifelt werden, dass sich CO₂ in bezahlbaren Lagern dauerhaft, ohne Ewigkeitskosten, immobilisieren lässt.

Eine schnellere und preiswerte Speichervariante wäre die Überführung von Biomasse in Holzkohle, in einer Form, die eine Wiederverwertung ausschließt. Die Lebensdauer von Holzkohle ist in der Praxis begrenzt.

Eine Speicherung ohne Verfallsdatum wäre, als Beispiel, die technische Bindung atmosphärischen Kohlenstoffs in Siliziumcarbid, SiC. Die gut erforschte Substanz ist ungiftig, chemisch sehr stabil und kann ohne jede Umstände gelagert werden.

Gegenwärtig fällt SiC vornehmlich in technisch sehr anspruchsvollen Anwendungen auf (von Schleifpapier abgesehen) und ist dann teuer, was erklären mag, weshalb die Substanz bisher nicht als Koh-



Gräser, aber auch Schilf, Stroh und Spreu, lagern Silizium in der Form von Opalphytolithen (mikroskopische Abbildung links, Längsachse ca. 30 µm) aus Kieselsäure ab.



Reishülsen und andere Ernteabfälle enthalten Silizium und Kohlenstoff in einem Mengenverhältnis, das für die Synthese von Siliziumcarbid, SiC, günstig ist. Wird die Synthese mit erneuerbaren Energien angetrieben, kann Kohlenstoff ohne weitere CO₂-Emission auf lange Zeit der Atmosphäre entnommen werden, zugleich würde ein lästiger Abfall neutralisiert.

lenstoffsенke angedacht wurde. Auch benötigt die gängige Synthese von Siliziumcarbid große Mengen Strom. Neue Syntheseverfahren wie Combustion Synthesis kommen mit weniger Energie aus, die sich heute überdies CO₂-frei bereitstellen ließe.

Für den Reaktionspartner des zu bindenden atmosphärischen Kohlenstoffs im CO₂, das Silizium, lassen sich zahlreiche Quellen finden, die nicht sonderlich rein sein müssen: Ton, Sand, Diatomeenerde etc. Allerdings werden diese Siliziumquellen auch für andere Zwecke verwendet.

Eine günstige, dezentrale, umweltneutrale Siliziumquelle zur Herstellung von Siliziumcarbid wurde schon in den 1980er Jahren gefunden, als man nach einer billigen Methode zur Herstellung von SiC-Kurzfasern für die Verstärkung von Aluminiumoxidkeramik, Al₂O₃, suchte. Ein aussichtsreiches Verfahren war die Verkokelung der Hülsen von Reiskörnern, eines in großen Mengen erzeugten Abfallproduktes, das Silizium und Kohlenstoff in guter Proportion und reaktionsfreudiger, nanoskaliger Form enthält. Die erhaltenen SiC-Fasern erhöhten die Standfestigkeit von keramischen Schneidplatten für die Metallbearbeitung und die Temperaturbeständigkeit von Aluminiumblechen. Die Herstellungsverfahren von SiC-Fasern aus Reishülsen sind heute noch aktuell und Gegenstand von Patenten.



Silizium findet sich nicht nur in Reishülsen; in der Form von Kieselsäure ist das Element Bestandteil zahlreicher Pflanzen, meist in der Form von Opalphytolithen, mikroskopisch kleinen Einlagerungen. Gräser realisieren damit messerscharfe Kanten, die Pflanzenfressern zu schaffen machen. Strohhalme werden mit solchen Einlagerungen standfest, Schilfhalme ebenso, und dazu schwer entflammbar. Die Natur macht von Silizium im Milliarden-Tonnen-Maßstab Gebrauch, die Kieselsäuregehäuse von Diatomeen sind lagerstättenbildend.

Pflanzen setzen Silizium in solchen Mengen um, dass allein die geschickte Pyrolyse von Agrarabfällen mit SiC-Bildung deutliche Effekte haben sollte. Die SiC-Konversion ließe sich sehr wahrscheinlich in eine große Zahl ohnehin praktizierter dezentraler Prozesse wie Stromgewinnung aus Stroh, Schilf, Reishülsen, Reisstroh etc. einbauen, weshalb kein zusätzlicher Flächen- oder auch Transportbedarf entstünde. Das Endprodukt, ein Si/SiC-Granulat, kann als Baustoff, Füllmittel, Streugut etc. Verwendung finden, ähnlich Sand.

Mineralogische Detektivarbeit

Archäometrie

Granat zur Herstellung alamannischer Fibeln wurde während des 5. und 6. Jahrhunderts n. Chr. aus Indien importiert, während des 7. und 8. Jahrhunderts dagegen aus Böhmen. Das konnte durch archäologische Untersuchungen und vor allem durch chemische Analysen nachgewiesen werden. Ursache für den Wechsel der Bezugsquellen: Politische Verwicklungen am Roten Meer blockierten Ende des 6. Jahrhunderts den Nachschub aus Indien.



Woher stammt das Gold der Skythen? Wie wurden die Münzen der Kelten und Römer hergestellt? Wie hat man in der Vergangenheit aus Gesteinen Metalle gewonnen?

Aus welchem Gestein machten die Steinzeitmenschen ihre Werkzeuge?

Wie entwickelten sich die Rezepturen der Glasmacher vom alten Ägypten bis heute? Woher nahm man den Ton für Gefäße aus der Bandkeramik? Woraus besteht die Farbmalschicht auf Bildern? Solche Fragen aus der Archäologie kann ein Mineraloge durch eine Untersuchung der archäologischen Fundobjekte mit zerstörungsfreien Analysemethoden beantworten.



Die Ergebnisse liefern ähnlich wie bei einer kriminaltechnischen Untersuchung wichtige Beweise und Informationen über die Fundobjekte. Diese sind z. B. die Materialzusammensetzung, die Reinheit der Objekte, die Herstellungstechniken und -prozesse, die geologischen Alter der verwendeten Rohstoffe, der Herstellungszeitpunkt der Fundobjekte oder chemische Veränderungen von Knochen und Zähnen. Dank solcher Informationen liefert die Mineralogie wichtige Hinweise zur Beantwortung der archäologi-

schen Fragestellung. Der Archäologe kann dann diese Ergebnisse mit seinen eigenen zusammenführen und so den damaligen Wissens- und Kenntnisstand zu Material und Herstellung erklären, wie die Entwicklungsschritte von Produktionsprozessen, das Alter von Funden, deren Echtheit, Imitation und Fälschung, Veränderungen in den Nahrungsgewohnheiten und vieles mehr.

Dies liefert am Ende wichtige Informationen für das Verständnis unserer Kulturgeschichte, darunter Mobilität und Migration von Mensch und Tier, Verfügbarkeit und Nutzung von Georessourcen, die regionale, überregionale und zeitliche Verbreitung von Materialien und der Austausch von Waren.

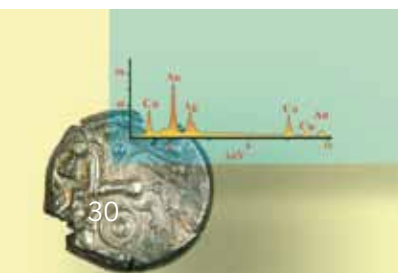
Denkmalpflege

Was geschieht bei der Verwitterung der Bausteine alter Gebäude? Wie kann man mittelalterliche Kirchenfenster vor Korrosion schützen? Mit welchen Pigmenten kann man Wandmalereien restaurieren? Antworten auf solche Fragen sind für Denkmalschutz und -pflege besonders wichtig. Die Mineralogie kann Schadensbilder an Kulturgütern analytisch genau erfassen, die Ursachen erkennen und damit angemessene Maßnahmen zur Schadensverhütung und -behebung einleiten. Für eine fachgerechte Konservierung geschädigter Kulturgüter ist es außerdem notwendig, das ursprüngliche Material wie Bausteine, Farbpigmente oder Keramikelemente genau zu charakterisieren.

Wandmalereien der Dorfkirche Thierfeld/Hartenstein im Erzgebirge aus dem 13. Jh. sind durch erhöhten Feuchtigkeitseintrag und Salzkristallisation sehr gefährdet.



Keltische Münze mit einem elementcharakteristisches Röntgenspektrum, das Auskunft über die Zusammensetzung der Münze gibt.



Mineralische Rohstoffe und ihre Veredelung

Lagerstättenforschung

Moderne Industriegesellschaften haben einen großen Bedarf an mineralischen Rohstoffen, die fast ausschließlich aus nicht nachwachsenden Quellen kommen. Die Lagerstättenforschung wendet – neben chemischen, technischen, geophysikalischen und wirtschaftsökonomischen Methoden – auch das technisch-wissenschaftliche Instrumentarium der Mineralogie an.

Die Lagerstättenforschung – das methodische Verstehen, wie ein Rohstoff entsteht und abgebaut wird – umfasst

- die Methoden des Auffindens der Schätze der Erde in Form spezieller Gesteins- und Erzmetallvorkommen,
- die wissenschaftliche Begleitung des Abbaus von Lagerstätten,
- die Unterstützung bei der Entwicklung und Verbesserung von Verfahren zur Metallextraktion aus dem gewonnenen Erz,
- Beiträge zur Lösung rohstoffpolitischer Fragestellungen wie z. B. aktuellen Problemen des internationalen Rohstoffhandels.

Für alle genannten Stadien hat es in der letzten Dekade eine rasante Entwicklung der Forschungsapparaturen und -methoden gegeben, woraus sich neue, z. T. bislang ungeahnte Möglichkeiten insbesondere auf dem Feld der Mineralogie ergeben.

Wie findet man eine Erzlagerstätte? In der Vergangenheit wurden große Erzanreicherungen meist zufällig gefunden, häufig durch Bauern, Trapper, Handelsleute oder Wanderer. Heute werden Lagerstätten systematisch gesucht. Wichtig dafür ist zunächst das Verständnis der Entstehung der Lagerstätte und der Anreicherungsprozesse, die oftmals über Jahrmillionen gewirkt haben. Mineralogen untersuchen dabei in polierten Gesteinsplättchen eingeschlossene kleinste Tröpfchen von Schmelzen und Lösungen, um anhand dieser Zeugen der Lagerstättenbildung die Geschichte der Umverteilung, Anreicherung und Fixierung der Metallverbindungen im Gesteinskörper

zu verstehen. Die Befunde werden mit anderen geologischen Daten kombiniert und daraus Kriterien zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Lagerstätten abgeleitet.

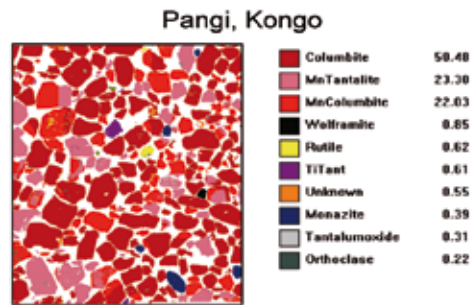
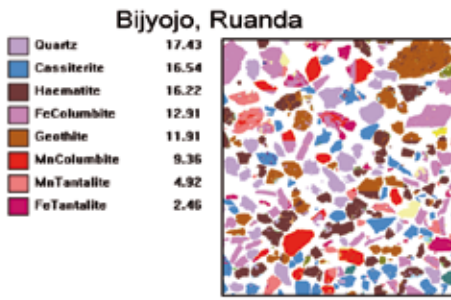
Ist eine Lagerstätte entdeckt und der Abbau der Erze in vollem Gange, stellt sich die Frage nach der genauen Verteilung der oft feinkörnigen Erzkomponenten in bestimmten Lagerstättenbereichen. Auch können bislang unberücksichtigte Spurenmetalle im Erz zusätzliche Erlöse bringen. Hier werden detaillierte Informationen benötigt, bei deren Beschaffung Mineralogen gleichfalls helfen können. Untersuchungen von Erzen mittels Lichtmikroskop liefern, gekoppelt mit modernsten hochauflösenden Spurenelementanalysen (Elektronenmikroskopie; Laser-Massenspektrometrie), die erforderlichen Daten zur Analyse der Wirtschaftlichkeit des Abbaus solcher Erze.

Bei der Entwicklung integrierter nachhaltiger metallurgischer Verfahren zur Metallgewinnung aus dem Erz und zu dessen weiterer Veredelung liefern



Auflichtmikroskopisches Bild eines Platin-Erz-Anschliffes mit sulfidischen Platin-Mineralen

Mineralogen wichtige Grundlagen. Diese Forschungsarbeiten bezeichnet man als prozess-mineralogische Untersuchungen. Die ersten Prozessstufen der Erzaufbereitung bestehen im Allgemeinen im Brechen und Mahlen der gewonnenen groben Gesteinsbrocken. Prozess-mineralogische Untersuchungen



Quantitative Mineralzusammensetzung von zwei Tantal-Erz-Konzentraten bestimmt mittels automatisierter Mineralogie-Software am Rasterelektronenmikroskop

am Mahlgut nutzen Softwareprogramme zur automatisierten Erzminerallerkennung und zur Beschreibung der Eigenschaften der Erzkörner. Die Ergebnisse dieser elektronenmikroskopischen Verfahren zeigen z. B. auf, welcher Anteil der Oberfläche der nach dem Mahlen vielen tausend winzig kleinen Gesteinskörner wirklich Erz ist und wie gut man diese Körner vom tauben Gestein, d.h. dem Abfall, trennen kann.

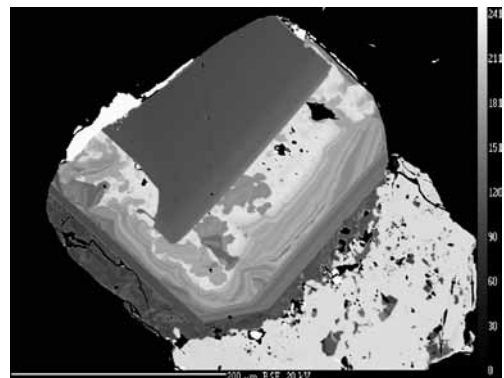
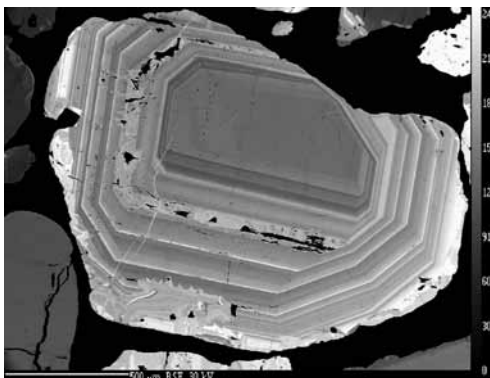
Schlussendlich werden Produkte des Bergbaus aus den Gewinnungsländern über oft viele Zwischenhändler, sogenannte Handelsketten, zu den Orten ihrer Weiterverarbeitung verkauft. Dieses trifft insbesondere auf Rohstoffe mit hohem Materialwert zu, die – neben dem großindustriellen Abbau – auch im Kleinbergbau gewonnen werden (z.B. Edelmetalle, Edelsteine, strategische Metalle wie Tantal). Werden Erlöse aus illegalem Bergbau zur Finanzierung von bewaffneten Konflikten genutzt oder entsprechen die Lebensbedingungen der Bergleute nicht Mindestanforderungen, so sollten die so produzierten Rohstoffe erkennbar sein, um Maßnahmen zur Verbesserung der Situation ergreifen zu können. Hierzu dient die Zertifizierung von Handelsketten basierend auf Audits und Dokumentationen. Als „Werkzeug“ wurde in Deutschland ein mineralogisch-geochemischer Herkunftsnachweis für Tantal-Erze entwickelt, der

mineralogische Eigenschaften der Erzkörner und ihre chemische Zusammensetzung (insbesondere Spurenelementgehalte) für eine Zuordnung zur Gewinnungsstätte nutzt. Die Einführung dieses „analytischen Fingerprints“ für Tantal-, Zinn- und Wolfram-Erze wird gegenwärtig mit Unterstützung der deutschen Bundesregierung vorbereitet.

Die Preisentwicklung für einen Wertstoff ist schwer vorherzusehen. Der gegenwärtige Star am Hochtechnologiehimmel, Indium, gilt als für viele zukunftssträchtige Anwendungen unentbehrlich, was das Element nicht vor schweren, teils politisch angestoßenen Preisschwankungen schützt. Dabei ist die Abkunft des Indiums noch nicht einmal edel, es wird großenteils als Beiprodukt aus der Flugasche spezieller Kupferhütten gewonnen – aber es wird dringend gebraucht.

Ohne Zweifel edel, aber nicht gebraucht, war Platin, als die spanische Regierung 1758 dessen Ausfuhr von Kolumbien nach Europa verbot: Das Metall war für die Fälschung von Gold verwendet worden. In der Folge wurden Tonnen davon ins Meer geworfen oder in den Flüssen Bogota und Cauca versenkt.

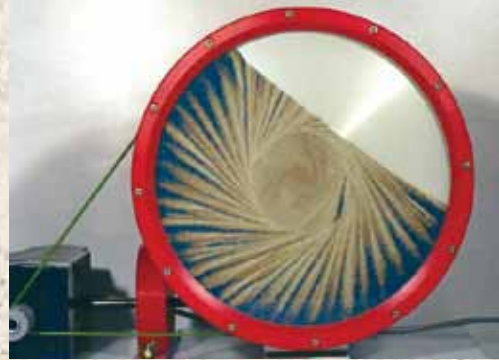
Elektronen-optische Bilder von zwei zonierten Tantal-Erz-Körnern aus einem Erzkonzentrat



Aufbereitung und Veredelung



Bei einem mittleren Gehalt von fünf Gramm pro Tonne von Goldlagerstätten sind für einen Kilogramm-Barren 200 Tonnen Gestein aufzubereiten.



Spontane Entmischung unterschiedlich großer Sandkörner in einer Rührtrommel

Die Techniken zur Gewinnung, Vorverarbeitung und Veredelung von mineralischen Rohstoffen haben eine lange Tradition. Eine Variante der Kupfergewinnung ist typisch für viele Erze: Das kupferhaltige Gestein wird in großen Stücken zu einer Mühle gefahren, dort in kleinere Stücke zerlegt und als wässrige Aufschlämmung, slurry, zu einer Kugelmühle transportiert. Darin zerlegen Stahlkugeln das Erz in feine Teilchen. Beim anschließenden Flotationsprozess werden der Brühe spezielle Chemikalien zugesetzt, eingepresste Luft erzeugt einen Blasenstrom, an den sich die kupferhaltigen Teilchen anheften und mit dem Schaum an der Oberfläche abgeschöpft werden können; unerwünschte Partikel sinken dagegen ab. Der getrocknete Schaumextrakt enthält 15 bis 33 Prozent Kupfer. Ähnlich werden andere Erze angereichert, beim Eisen bieten sich magnetische Verfahren an.

Die große Menge der umgesetzten Stoffe macht auch kleine Verbesserungen der Effizienz der Verfahren lohnend, die mineralogische Forschung greift heute dazu auf das Gebiet der komplexen Materie zurück. Dieser Zweig erkundet unter anderem – auch mit Computersimulationen – wie sich Partikel in großen Mengen verhalten, wenn sie etwa in wässrigen Aufschlämmungen Rohre passieren; wie sich Schüttgüter auf vibrierenden Schüttlern in verschiedene Fraktionen

zerlegen und mitunter frappierende Muster bilden oder wie Partikel in Lösung ausflocken. Dies hilft, neue Anreicherungsverfahren zu finden und Störungen der Prozessabläufe durch Blockaden oder Produktmängel wie Verklumpungen zu vermeiden.



Tonminerale in ihrer schönsten Form: Die Kugelspielerin, 1898

Mineralogiestudium an deutschen Universitäten

Das Studium des Faches Mineralogie ist an vielen Universitäten möglich. Das Fach ist meistens in den Studiengang Geowissenschaften als Spezialisierungsrichtung integriert: Sechs Semester bis zum Abschluss Bachelor of Science, (B.Sc.) und weitere vier Semester bis zum Abschluss Master of Science (M.Sc.). Die gestufte Studienstruktur ermöglicht auch den Quereinstieg von B.Sc.-Absolventen aus Physik,

Chemie, usw. in einen M.Sc.-Studiengang mit mineralogischem Schwerpunkt. In der Regel qualifizieren sich Mineralogen wie andere Naturwissenschaftler/innen durch eine meist 3-jährige Promotionsarbeit zum Dr. rer. nat. weiter. Die entsprechende Forschungsarbeit kann an jeder Universität, aber auch an reinen Forschungsinstituten oder in der Industrie geleistet werden.



**Mehr Infos bei den Zentralen Studienberatungen
der Universitäten und Hochschulen
oder auf unserer Homepage:**

www.dmg-home.org

Bildnachweis

Titel: Heidi Höfer, Universität Frankfurt; Anetta Banas, University of Alberta, Kanada; ZEISS Microscopy

Seite 1: von oben nach unten: Universität Köln; NASA/ESA; Thomas Stachel, University of Alberta Kanada; Rupert Hochleitner, LMU München

Seite 2: oben: Histor. Darstellung, 19. Jahrh.; Mitte: Kompetenzzentrum Nanoanalytik, Hamburg; unten: Schott lithotec AG, Jena; Seitenränder Mitte: ESA

Seite 3: oben: NASA/Biodesigner, Montage: BergerhofStudios, Köln; unten rechts: Siemens AG, München; Insert: Universität Basel

Seite 4: ESA/NASA, MPI für Astronomie, Heidelberg

Seite 5: oben: STS-9 Crew, NASA; Mitte: NASA/LPI; rechts: NASA

Seite 6: links 1, 2, 3: Dominik Hetzel, Universität Köln; unten: Montage BergerhofStudios, Köln

Seite 7: oben links: National Geographic/ Renate Troyer-Berann; unten rechts: Hans Seck, Universität Köln

Seite 8: Peter M. Herzig, Geomar Kiel

Seite 9: GFZ, Potsdam

Seite 10: oben: Jens Fiebig, Universität Frankfurt; unten: NASA

Seite 11: Patrick O'Brien, Universität Potsdam

Seite 12: oben: Thomas Stachel, University of Alberta, Kanada; unten: Rupert Hochleitner, LMU München

Seite 13: oben rechts, Mitte: Anton Eisenhauer, Geomar Kiel; unten: Bearbeitung: Bergerhof-Studios, Köln

Seite 14: oben: Friedhelm von Blankenburg, Universität Hannover; Mitte: Heidi Höfer, Universität Frankfurt; unten: ESRF, Grenoble

Seite 15: oben links: IBM international; unten: Friedhelm von Blankenburg, Universität Hannover

Seite 16: Heidi Höfer, Universität Frankfurt

Seite 17: REM-Labor Universität Basel

Seite 18: Alexander Riss/TU München

Seite 19: von oben: 1. Universität Greifswald; 2.,3.: Patrick O'Brien, Universität Potsdam;

4., 5.: ZEISS Microscopy; 6.: Ruhruniversität Bochum; 7.: Anetta Banas, University of Alberta, Kanada; unten links: NASA/Uni Mainz

Seite 20: von oben: 1.: BergerhofStudios, Köln; 2.: Universität Köln; 3.: Universität Frankfurt; 4.: DESY, Hamburg

Seite 21: oben rechts: Universität Köln; Mitte: Dirk Bosbach, Forschungszentrum Karlsruhe; unten: Schott Lithotec AG, Jena

Seite 22: oben: Bauhaus-Universität Weimar; unten: Element Six B.V.

Seite 23: Hintergrund: BergerhofStudios, Köln; Insert: Universität Regensburg; unten: Institut für Paläontologie, Universität Bonn

Seite 24: oben: Hoechst AG/BergerhofStudios, Köln; links: Hoechst AG; unten: INT, Saarbrücken

Seite 25: oben: IFW, Dresden; Mitte: RWE Deutschland AG

Seite 26: oben: German Müller, Universität Heidelberg; Mitte: Axel Schippers, BGR Hannover; unten: Dirk Bosbach, Forschungszentrum Karlsruhe

Seite 27: Axel Schippers, BGR Hannover

Seite 28 rechts: BergerhofStudios, Köln; insert: Bearbeitung einer Vorlage von Christian Mulder; Universität Utrecht

Seite 29: Emanuel Schmidt-Halswick; Insert: jm1366, iStock

Seite 30: links: 1. Dieter Quest, Heimatmuseum Friedigen; 2.: Klaus-Peter Kelber, Universität Würzburg;

3.: Chris Bendall, Universität Frankfurt; rechts: Steffen Laue, FH Potsdam, FB Architektur und Städtebau

Seite 31: BGR Hannover

Seite 32: BGR Hannover

Seite 33: oben links: proaurum, München; oben rechts: Universität Bayreuth; unten: Staatliche Porzellan-Manufaktur, Meißen

Seite 34: / Design Christian Mieland

Umschlag hinten: Heidi Höfer, Universität Frankfurt; ZEISS Microscopy

Impressum

Herausgeber

Deutsche Mineralogische Gesellschaft
www.dmg-home.org

Koordination

Dr. Heidi Höfer, Goethe-Universität, Frankfurt am Main

Autor

Dr. Mathias Schulenburg, Köln

Gestaltung

Umschlag: Christian Mieland /
www.mieland.de

Inhalt: Suzy Coppens, BergerhofStudios, Köln /
www.bergerhof-studios.de

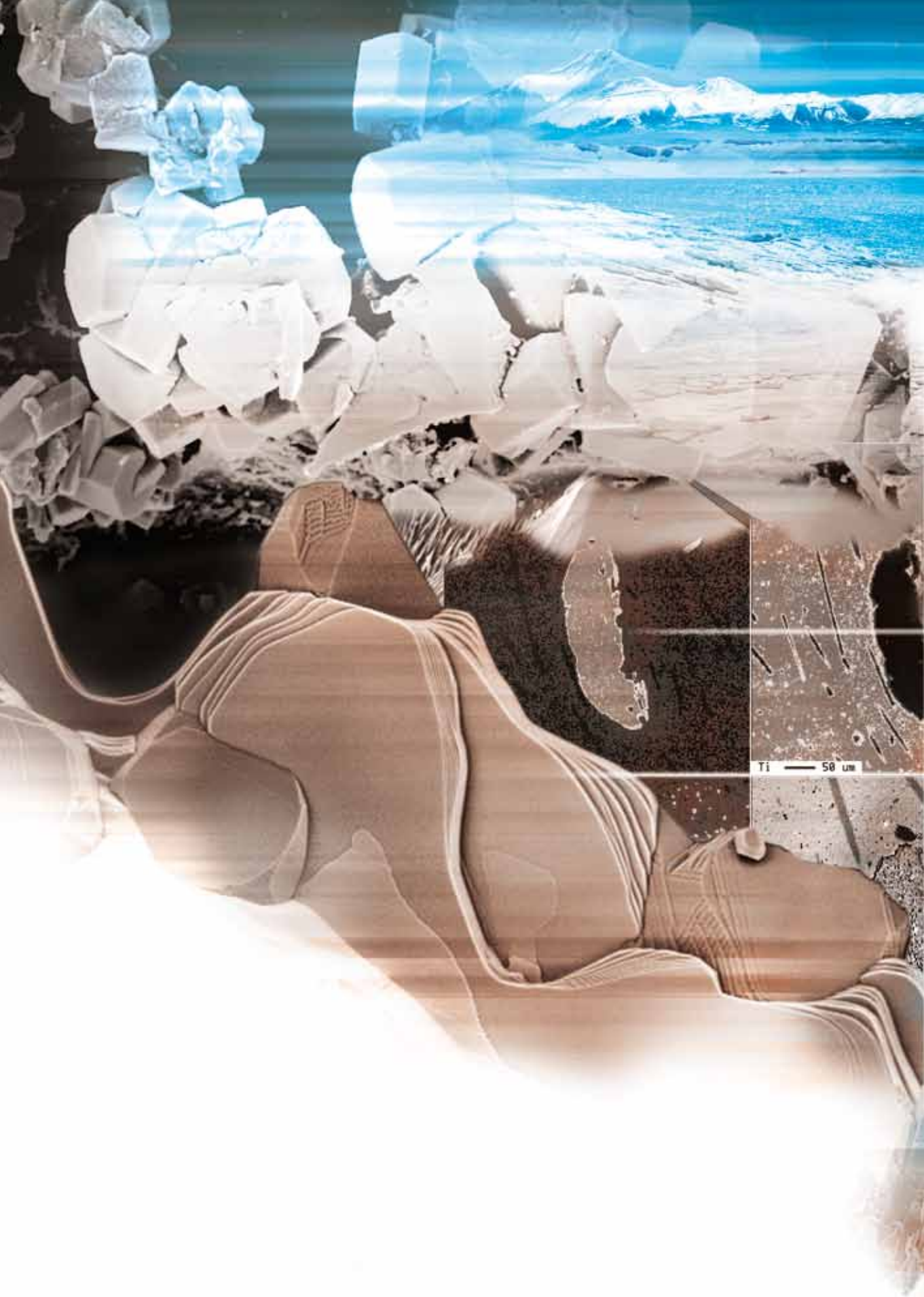
Druck

2. überarbeitete Auflage

Druckerei?

Stand

Juni 2017



DMG
Deutsche
Mineralogische
Gesellschaft

www.dmg-home.org