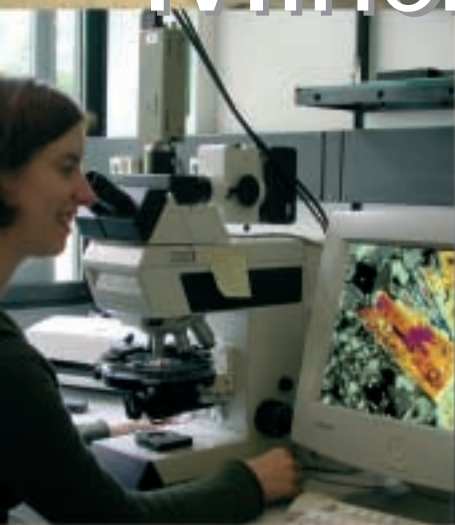
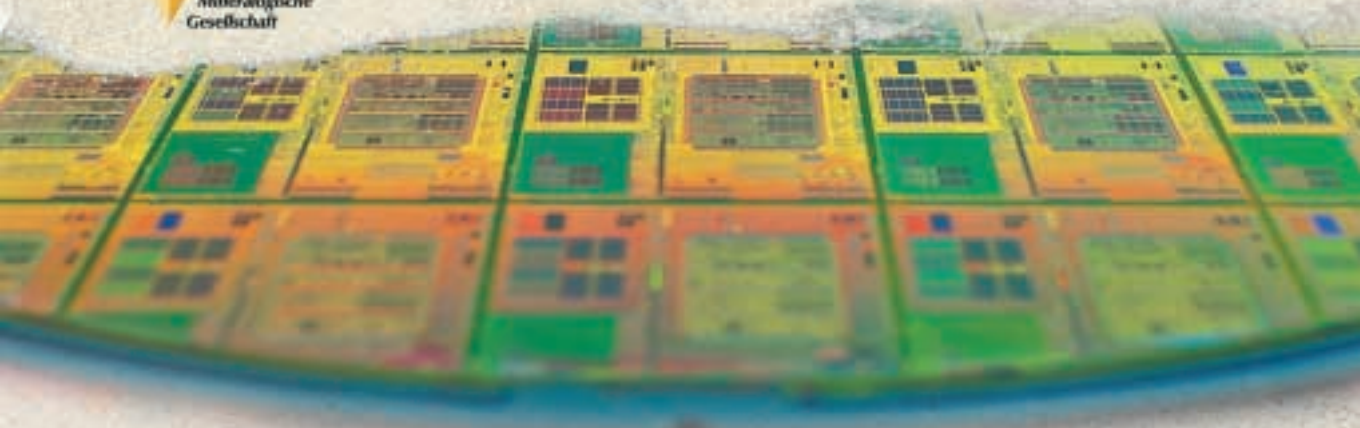




# Mineralogie



## Material- und Geowissenschaft



# Impressum

## **Herausgeber**

Deutsche Mineralogische Gesellschaft  
[www.dmg-home.de](http://www.dmg-home.de)

## **Koordination**

Prof. Dr. Hans Seck  
Institut für Mineralogie und Geochemie,  
Universität Köln

## **Autor**

Dr. Mathias Schulenburg, Köln

## **Gestaltung**

Suzy Coppens, BergerhofStudios, Köln  
[www.bergerhof-studios.de](http://www.bergerhof-studios.de)

## **Druck**

Druckhaus Locher GmbH, Köln

## **Stand**

Juli 2004

## **Bildnachweis Umschlag:**

Titel oben: Staubwolke im All: NASA  
Landschaft: Olaf Bubbenzer, Geografisches  
Institut, Uni Köln  
Mitte v.l.: M. Burchard, O. Medenbach, Schott  
Lithotec AG, Jena  
unten: Sand mit Chip: AMD, Dresden; Montage  
BergerhofStudios, Köln

Rückseite: Olaf Medenbach, Ruhruniversität  
Bochum



Meteoriten im  
antarktischen Eis

Umschlagseite 2: Impressum

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 16: Kristalline Geheimnisse

Seite 18: Materialien der Angewandten Mineralogie

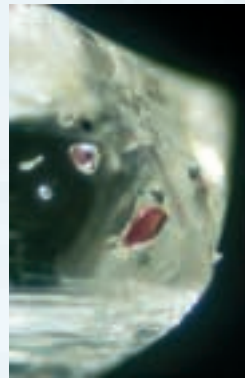
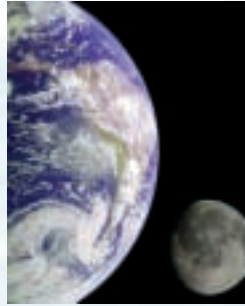
Seite 20: Mineralogie und Geochemie in der Umweltforschung

Seite 22: Mineralogische Detektivarbeit

Seite 23: Mineralische Rohstoffe und ihre Veredelung

Seite 24: Mineralogiestudium an deutschen Universitäten

Umschlagseite 3: Bildnachweis



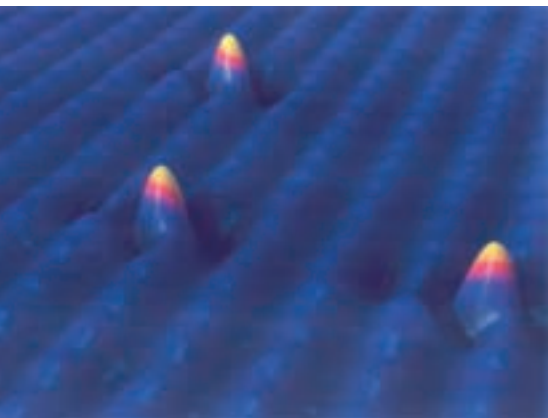
# Von Atom bis Zeolith – wie die Mineralogie wurde, was sie ist

*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*



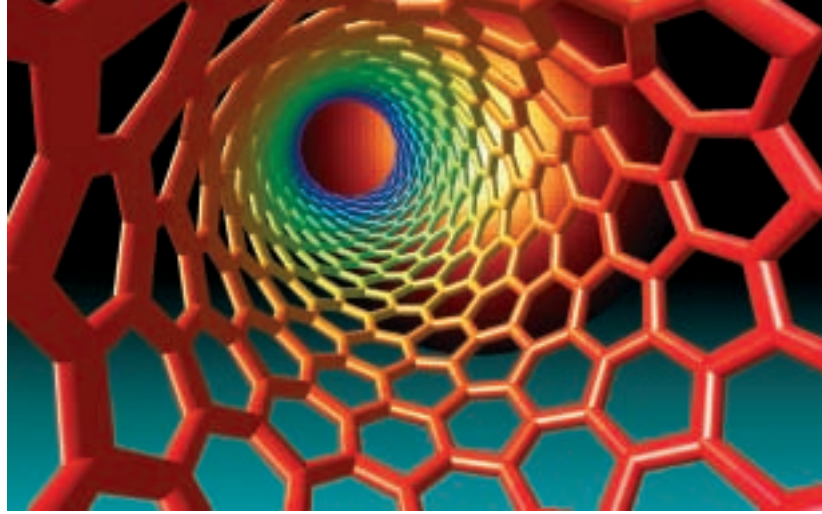
Wer etwa weiß, dass in den heißen Hüllen kohlenstoffreicher Sterne Diamanten entstehen - was aus der Analyse bestimmter Meteorite hervorgeht - wird versucht sein, mit ähnlichen Gegebenheiten Diamanten im Labor zu machen. Das gelingt mittlerweile mühelos; als Beschichtung aus einer Gasphase helfen die 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.

*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.*



Das Forschungsfeld der Mineralogie nimmt nicht nur weite Räume in Anspruch, es hat auch eine ehrwürdige Vergangenheit, welche die Entwicklung des modernen Weltbildes entscheidend 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 Röntgengerätschaften Instrumente wie die Elektronenstrahl-Mikrosonde getreten, die die elementare Zusammensetzung etwa einer Gesteinsprobe oder einer Legierung im Mikrometer-Maßstab zu bestimmen gestattet. 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 ebenfalls *quite diverse*, 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 Neuzeit, das Silizium, aus einem wohlbekanntem 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 Systems Erde. 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 Hoch-  
temperatur-  
Supraleiters)*



# Mineralogie an der Wiege des Sonnensystems

Hintergrund: Der Orion-Nebel,  
Wiege zahlreicher Sonnensysteme

## Der Urnebel

**B**eim Urknall vor ca. 14 Milliarden Jahren entstanden lediglich Wasserstoff und Helium. Die ersten Sterne, die Geburtsstätten aller anderen Elemente, gab es bereits 200 Millionen Jahre später. 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 4,56 Milliarden Jahren durch den Kollaps einer interstellaren Molekülwolke, angestoßen vielleicht durch die Schockwellen einer Supernova. Die Sonne begann sich zu bilden und immer mehr Materie zu „schlucken“. Ein kleiner Rest, 0.14 % der Materie des Sonnensystems, blieb aus bislang unerklärlichen Gründen übrig. Diese Restmaterie begann durch ständige Zusammenstöße zu immer größeren Körpern zu wachsen. Unser Planet 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. Späteres lokales Aufschmelzen des festen Erdmantels und Aufstieg der Schmelze an die Erdoberfläche führten zur Bildung einer festen Kruste.

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.

*Stern am Ende seiner Lebensdauer.  
Mit der Gaswolke wird ein Teil der vom  
Stern synthetisierten schwereren  
Elemente freigesetzt*

*Die freigesetzte, mit schweren  
Elementen angereicherte  
Materie findet in Protoplanetaren  
Scheiben wieder zusammen, aus  
denen sich Sonnen mit festen  
Planeten bilden können*



## Einschlag !

Zu der aufschlussreichen Beschreibung der Chemie und der mineralischen Phasen eines Meteoriten sind in jüngster Zeit raffinierte Analysen der Isotopenverhältnisse getreten. Die chemischen Eigenschaften eines Elements werden von der Zahl der Protonen im Kern seiner Atome bestimmt, die Kerne aber variieren in der Zahl der Neutronen und damit der Masse, mithin kann ein Element verschiedene Isotope besitzen. Isotopenverteilungen aber sind astrophysikalisch sehr aufschlussreich. Mittlerweile können Mineralogen auf Instrumente zu-

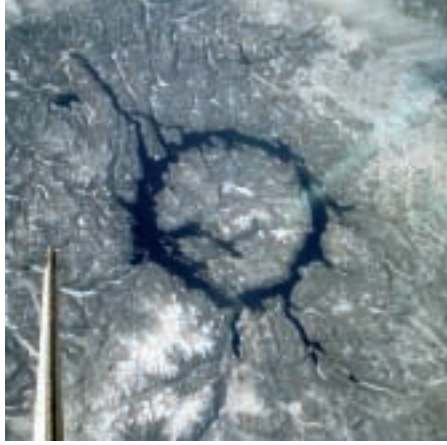


10 km

Lake Bosumtwi, Einschlagkrater, Ghana

rückgreifen, die Element- und Isotopenanalysen im Mikrometer-Maßstab gestatten. 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 so stark variiert, dass sie noch die Signatur ihrer ursprünglichen Entstehung im Inneren von Sternen tragen. Sie sind älter als die übrige Materie des Sonnensystems, das isotopisch erstaunlich gleichförmig ist, was aus den Isotopenanalysen von irdischem Material, Mond und Meteoriten hervor geht.

Das Universum begann mit dem Urknall vor ca. 14 Milliarden Jahren; das Sonnensystem bildete sich vor genau 4,56 Milliarden Jahren. Nach wenigen weiteren zehn Millionen Jahren war die Erde fertig. Das geht aus der Analyse kleinster Variationen der Häufigkeit des Wolfram-Isotops  $^{182}\text{W}$  in Meteoriten und irdischen Gesteinen hervor.



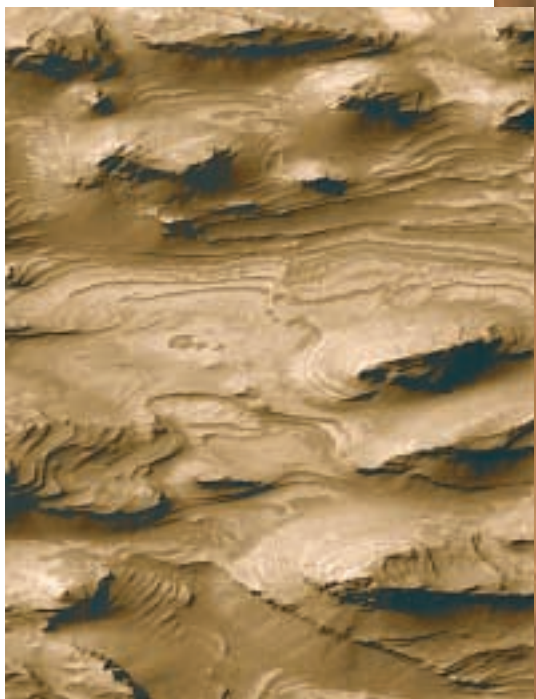
70 km

## Bruder Mars

Auch der Mars ist mineralogisches Terrain. Etwa 30 Meteorite sind als vermutliche Bruchstücke des Roten Planeten bekannt, die durch einen Meteoriteneinschlag dort so stark beschleunigt wurden, dass sie das Schwerefeld des Mars verlassen konnten und in einigen Fällen mit der Erde kollidierten. Viele der Marsmeteorite haben als Erinnerung daran zahlreiche Mineral-Modifikationen im Inneren behalten, die nur bei Höchstdruck entstehen.

Andere Mars-Meteorite bergen noch interessantere Indizien: ALH84001 zeigt Ketten mineralischer Nanopartikel, die sich mit gutem Willen als einem Mikrofossil zugehörig deuten lassen. Der Meteorit zeigt Baumringen ähnliche Säume, die am Boden eines alten Mars-Ozeans gewachsen sein könnten. Wahr oder nicht – wenn es um Wasser auf dem Mars geht, sind wieder Mineralogen gefragt.

*Rätselhafte Gräben, Terrassen auf dem Mars – Werke einstiger Wassermassen ?*



# Reise zum Mittelpunkt der Erde



Steinmeteorit (Chondrit)



Steineisenmeteorit, Pallasit (Olivin, FeNi-Metall)



Angeätzter Eisenmeteorit mit Widmanstättenschen Figuren

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

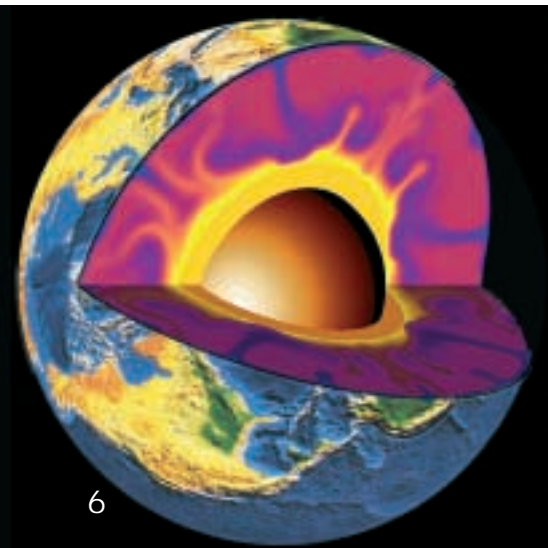
Die Entdeckung des – an den alten Vorstellungen gemessen - ungeheuerlichen Alters der Erde, besonders dessen Präzisierung, ist der Entwicklung hochgenauer Datierungsmethoden zu verdanken, die den radioaktiven Zerfall verschiedener Isotope als Zeitmaß verwendet. Diese Methoden setzen eingehende mineralogisch-kristallographische Kenntnisse und große Sorgfalt voraus, dann aber kann – etwa anhand von Uranisotopenanalysen an den Mineralen Merrillit und Apatit in kohligten Chondriten - das Alter z.B. von Einschlüssen des Allende-Meteoriten von 4,566 Milliarden Jahre auf weniger als 1 Million Jahre genau bestimmt werden – 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 verbanden sich die Elemente der protoplanetaren Scheibe chemisch zu Körnern, diese wuchsen durch elektrostatische Kräfte zu Flocken zusammen, die durch Zusammenstöße zu metergroßen Klumpen wurden, die die Gravitationskraft schließlich zu Planetesimalen, Mini-Planeten, zusammtrieb, die wiederum zu einem großen Planeten zusammenfanden oder aus ihrer Bahn geworfen wurden.

Die junge Erde wurde von mehreren Quellen mit Energie gespeist; zum einen hatten die in ihr zur Ruhe gekommenen Körper eine beträchtliche Bewegungsenergie besessen, die sich in Wärme umgewandelt hatte, zum anderen war die kondensierte Materie zu einem geringen Teil hoch radioaktiv und steuerte große Mengen Zerfallswärme bei. In der Folge begann das Material zu schmelzen und sich in schwere und leichte Bestandteile zu entmischen, was noch mehr Wärme frei setzte. Metallisches Eisen sank nach unten, leichte Silikate strebten nach oben.

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

gungen 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 Tiefsee-gräben, begleitet von vulkanischen Inselbögen, markiert. Dort, wo Kontinente aufeinander stoßen, entstehen unvorstellbare Deformationskräfte, türmen sich riesige Gebirge auf wie der Himalaja.



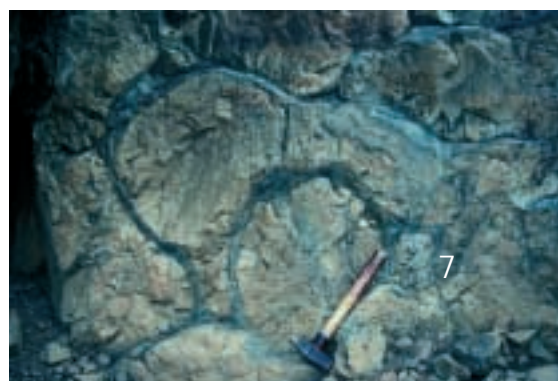
Das Höhenprofil der Erde enthüllt untermeerische Gebirge wie den mittelatlantischen Rücken

Kontinente meist mächtiger als unter den Ozeanen, im Durchschnitt 80 Kilometer 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 extrem langsam in geologischen Zeiträumen von hunderten von Millionen Jahren ablaufen. Von den Bewe-

## Seafloor spreading

Was die Erde in den Tiefsee-gräben 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, das sich von 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 Meer-

*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 Wärmepumpen, die von Meerwasser durchflutet werden. Die vom Wasser ausgelaugten chemischen Elemente werden als schwerer lösliche Verbindungen wieder ausgeschieden – ein wesentlicher Mechanismus der Lagerstättenbildung

wasser 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 Laborkontrollen 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 magnetisierte Minerale haben das wechselhafte Erdmagnetfeld wie auf einem Tonband festgehalten, so eines der wichtigsten Argumente für die Realität der Plattentektonik beigesteuert und zugleich ein Archiv über die Geschichte des Erdmagnetfeldes angelegt.

## Black smoker

Der durch aufquellende Magmen strapazierte Meeresboden ist mineralogisch sehr interessant. Es gibt dort 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 beeinflussen, genauer: dessen Salzgehalt konstant halten. Alle zehn Millionen Jahre 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 zu bergen.



Messtrupp beim Aufstieg auf den Merapi, Indonesien

## Ring of Fire

**A**llein 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 chemi-

schen 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  $^{10}\text{Be}$  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: Der Vulkanismus der Inselbögen ist ausgesprochen explosiv, mit einem erheblichen Gefährdungspotential für die dort lebende Bevölkerung. Die katastrophalen Folgen von Vulkanexplosionen in dicht besiedelten Regio-

*Glühender Blockstrom am Merapi, Indonesien*





Messgerät zur Gasanalyse am Kraterrand des Merapi

nen sind heute in den ausgegrabenen Ruinenstätten Pompeji und Herculaneum am Fuß des Vesuvs 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

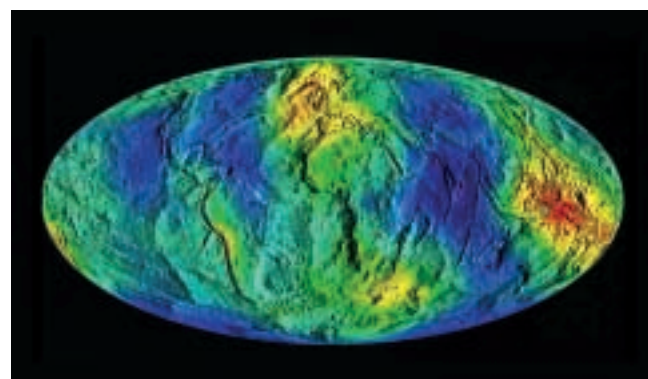
Äußerst beeindruckend allein ihrer schieren Größe wegen sind gigantische Vulkanbauten in den Weltmeeren. Die Vulkane Mauna Loa und Mauna Kea auf Hawaii erreichen Gipfelhöhen von mehr als 4.000 m, vom Meeresboden aus gerechnet ergeben sich Gesamthöhen von mehr als 10.000 m. Die Vulkane auf Hawaii werden vom 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 an-

gereichertes 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, 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. In den vergangenen

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



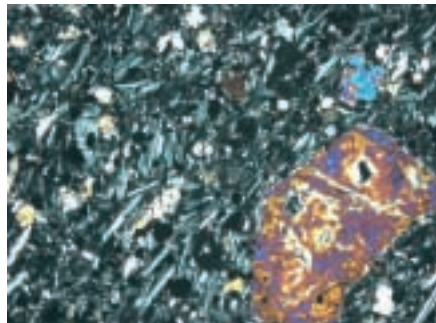
zwanzig Jahren ist deutlich geworden, dass durch Kollision und Subduktion oberflächennahe Gesteine in beachtliche Tiefen transportiert werden können. Wenn solches Material wieder an die Oberfläche kommt, können Mineralogen dessen Reise durch das Studium seiner textuellen und mineralogischen Veränderungen 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 an Granat und Jadeit reiches, Pyroxen-Gestein) umgewandelt. Eklogite und die sie umgebenden Gneise des Erzgebirges etwa enthalten sogar winzige Diamanten und das

diz, dass einmal ein ganzer Kontinent in diese enormen Tiefen gezogen wurde, durch eine Plattenkollision vor über 300 Millionen Jahren.

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 steigen verlässliche mineralische Zeugen aus Tiefen bis zu 300 Kilometern auf, in der Gestalt sogenannter Xenolithe, deren Name – Fremdgesteine – schon andeutet, dass sie in ihrer Umgebung eigentlich nichts zu suchen haben. Dabei handelt es sich meist um Eklogite, die



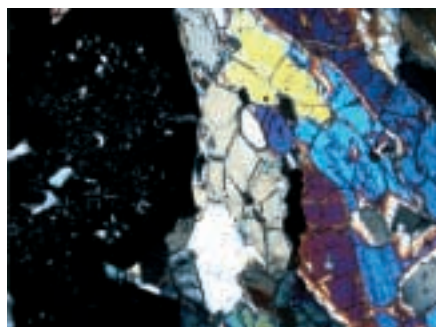
*Basalt (Stricklava)*



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



*Eklogit (rot: Granat, grün: Omphazit)*

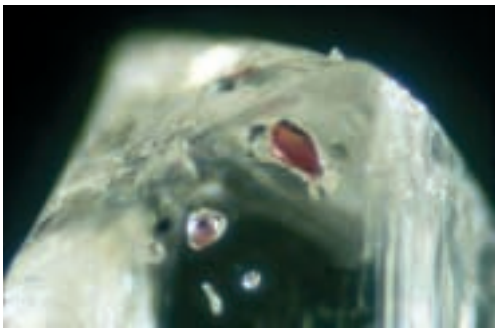


*Eklogit-Dünnschliff*

Hochdruckmineral Coesit (mit der chemischen Zusammensetzung von Quarz); für die Entstehung beider Minerale sind Tiefen von 100 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 der Deformationsprozesse geführt. Das Vorkommen dieser Minerale im Erzgebirge ist mithin ein In-

häufig Diamant führen, und Gesteine mit dem Magnesium-Eisensilikat Olivin als Hauptbestandteil, dessen schleifbare Schmuckvarietät als Peridot bekannt ist, wovon sich der Gesteinsname Peridotit ableitet. Xenolithe verdanken ihre Existenz regelrechten vulkanischen Explosionen, die sie so schnell aus dem Erdinneren an die Oberfläche befördern, dass ihr ursprünglicher Zustand erhalten bleibt.

Auch das edelste, zumindest teuerste aller Minerale, Diamant, bietet sich gelegentlich als Bote aus der Tiefe an, es enthält nicht selten Einschlüsse mit Mineralien vom Ort seiner Entstehung. Wenn der Stein klar genug ist, lassen sich diese Einschlüsse mit einem Lichtmikroskop studieren, mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde chemisch analysieren und im Elektronenmikroskop kristallographisch charakterisieren. Die Er-

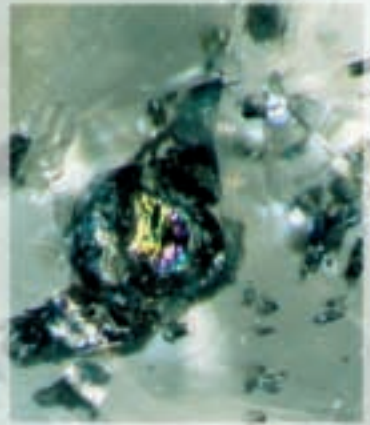


*Pyrop in Diamant (Ghana)*

gebnisse waren höchst aufregend. Als Einschlüsse fanden sich nicht nur Minerale, die man als Bestandteile der Xenolithe kannte, sondern auch neue Minerale, in denen Si von sechs Sauerstoffatomen umgeben ist; Minerale, die bis dahin nur in Hochdruckexperimenten synthetisiert worden waren. Sie entstehen, wenn Peridotite, die Gesteine des oberen Erdmantels, unter hohem Druck, der der tiefen Erde entspricht, instabil und in neue Gesteine umgewandelt werden. 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.

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

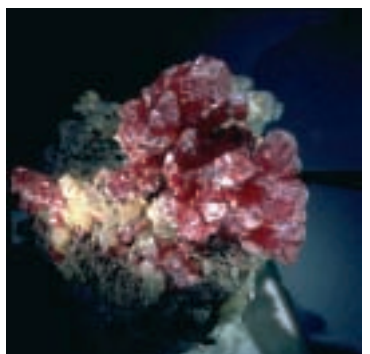
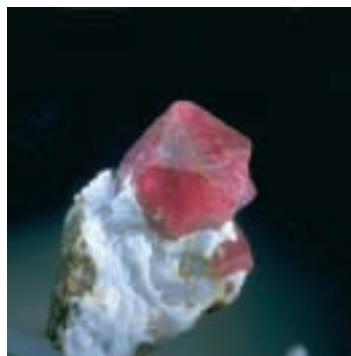
*Durch Zerfall von Olivin unter hohem Druck entstandener Ferroperiklas (Mg,Fe)O*



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 Astrophysikwissenschaften. Mit der Erforschung der physikalisch-chemischen Zusammenhänge leistet sie gleichermaßen wichtige Beiträge für die kommerziell bedeutsamen Felder Lagerstättenkunde und Materialwissenschaften.



## Das große Recycling

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, 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 Temparturregelung wichtig. Die mittlere Oberflächentemperatur der Erde beträgt  $15^\circ C$  (Vergleich Venus:  $430^\circ C$ ). 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 Erd-



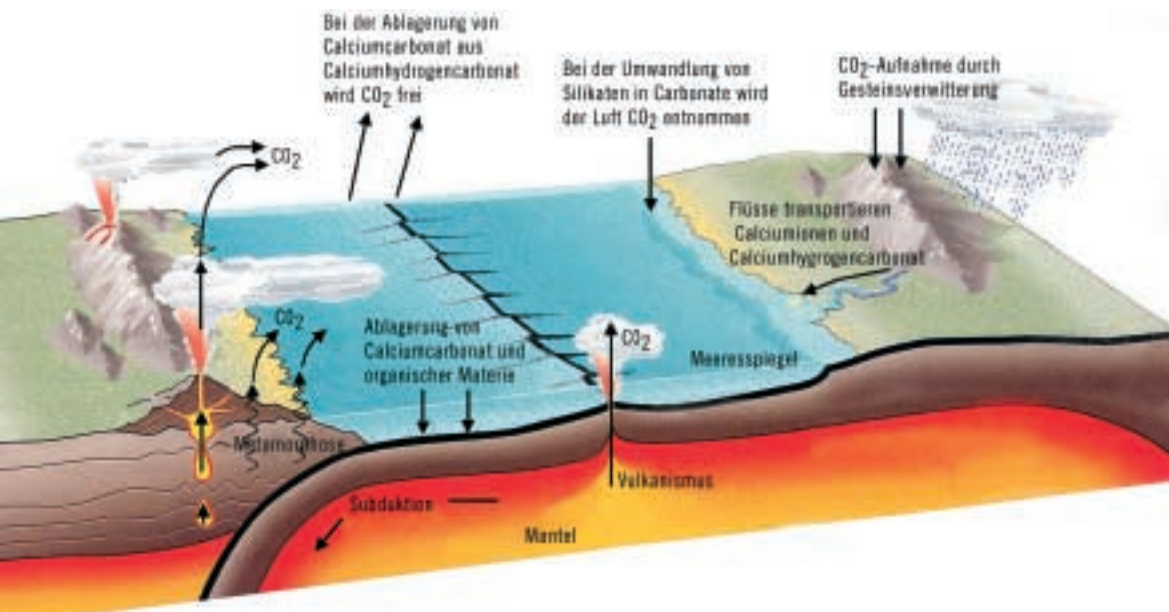
kruste) im Boden durch Kohlensäure,  $H_2CO_3$ , zersetzt. Es entsteht Calciumcarbonat, Kalk.

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.

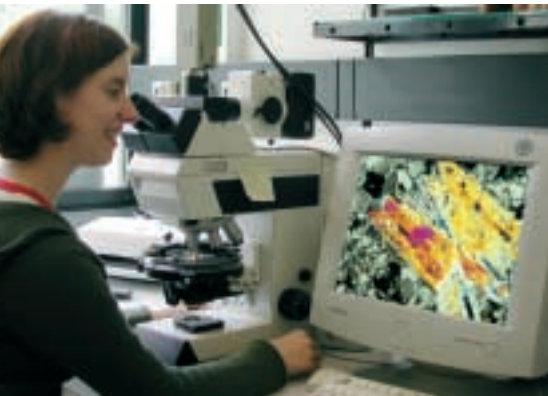


# Vom Massenspektrometer zur Hochdruckpresse



Arbeiten unter Reinraum-Bedingungen

Polarisationsmikroskopie



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



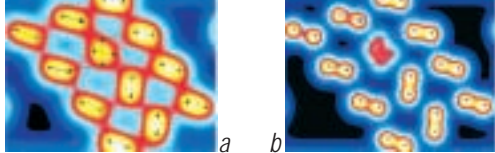
Die Entschlüsselung der Entstehungsprozesse von Gesteinen ist ein geradezu kriminalistisches Unterfangen, Spurensuche im wahrsten Sinne des Wortes.

**K**leinste 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

**Z**ur 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 auch detaillierte Kenntnisse über den strukturellen Aufbau von Mineralen. Mit der **Röntgen-Kristallstruktur-**





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

analyse, die die Materialwissenschaft revolutioniert hat, kann der innere atomare Aufbau eines Kriställchens ermittelt werden.

Die Unterscheidung von zwei- und dreiwertigem Eisen mit Hilfe der **Mößbauerspektroskopie** spielt in Mineralogie und Kosmochemie eine wichtige Rolle. So sind bei der MER-Mission auf dem Mars zur Zeit zwei an der Universität Mainz gebaute Mößbauersonden 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 Minuten schnelle 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** 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 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 punktweise 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 Gesteins-

dünnschliff durchzuführen. Im Falle des Zirkons macht sich der Geochronologe den zeitabhängigen Zerfall der Uranisotope  $^{238}\text{U}$  und  $^{235}\text{U}$  zunutze, bei dem die Bleiisotope  $^{206}\text{Pb}$  und  $^{207}\text{Pb}$  entstehen.



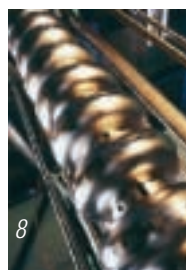
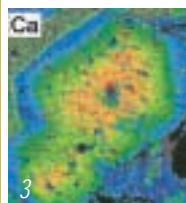
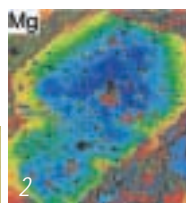
Zirkon aus einem Alpengranit. Das Verhältnis von Uran- zu Bleiatomen verrät das Alter des Minerals.

## 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.

von oben:

- 1: Punktanalyse mit Laserablation und Massenspektroskopie;
- 2, 3: Elementverteilung mit der Mikrosonde;
- 4: MgO im ESEM;
- 5: KCl im ESEM;
- 6, 7: Kristallwachstum im atomaren Maßstab, Rastertunnelmikroskop;
- 8: Röntgenlaser für die Mikrostrukturbestimmung von morgen



# 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.

## Die äußere Form

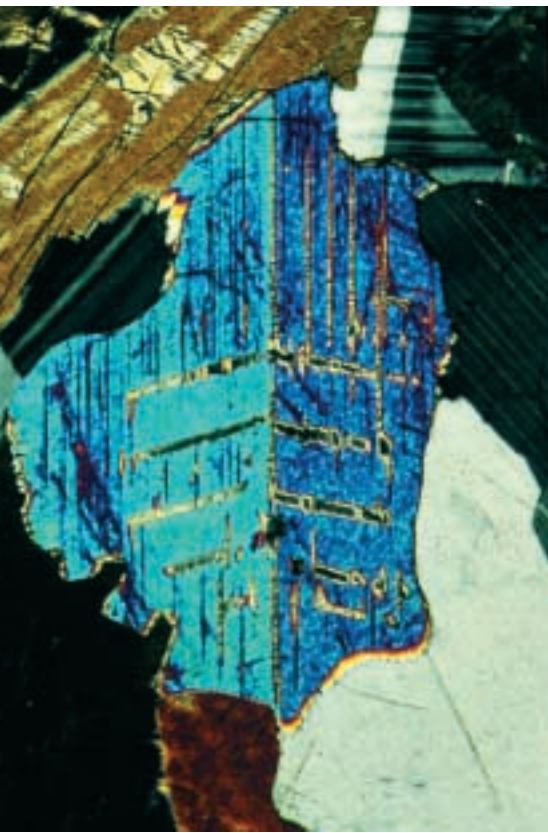
Die detaillierte Registrierung bestimmter geometrischer Eigenheiten der Kristallform eines Minerals war früher ein wichtiges Instrument für dessen Identifizierung; die Methodik hatte unter anderem zur Folge, dass Mineralogen schon „in Atomen dachten“, als die atomare Zusammensetzung der Materie noch 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

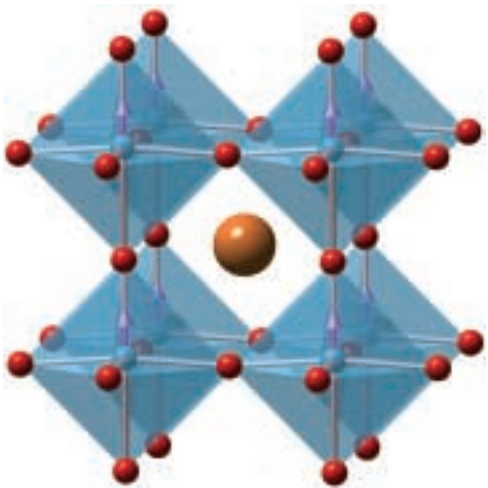
Die Wechselwirkung von Licht mit Kristallen ist so reich an Details, dass kristalloptische Methoden bis heute einen hohen Stellenwert haben. Allein mit einem guten optischen Mikroskop, das durch wenige bezahlbare Zusätze zu einem Polarisationsmikroskop ausgebaut worden ist, können Minerale in Gesteinsdünnschliffen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

## 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 immer komplexere Strukturen in Angriff genommen werden, wodurch dieser Zweig immer noch für Nobelpreise gut ist.



*Gesteinsdünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop, Zwillingskristall*

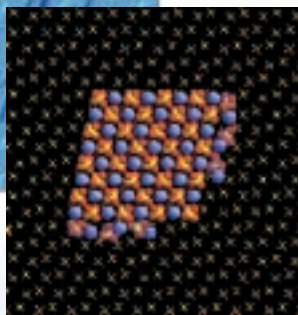
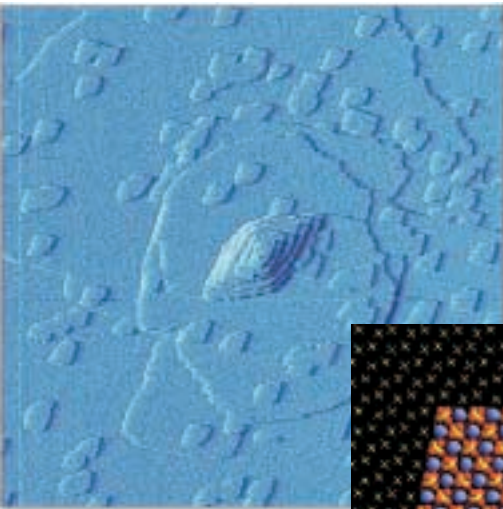


*Anordnung der Atome in der Perowskit-Struktur*

# 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 BaSO<sub>4</sub>-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 Kilogramm schwere Kristalle aus hochreinem Silizium sind heute die Stars unter den von Menschen hergestellten „Steinen“,



*Silizium-Einkristall zur Waferherstellung können heute mit 300mm Durchmesser hergestellt werden*

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

## Lithographie mit Flussspat

Es sind dünne, polierte Scheiben eines Silizium-einkristalls, 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 Nanometern vorgesehen, für das die herkömmlichen Optiken nicht mehr transparent sind. Optiken aus Calciumfluorid-Kristallen, Flussspat, aber lassen dieses UV-Licht durch und werden deshalb jetzt im großen Maßstab in höchster Qualität hergestellt. Die perfekte Beherrschung der Kristallisation eines Minerals kann mithin wirtschaftsstrategische Bedeutung haben.



*Optiken aus Flussspat*

# Materialien der Angewandten Mineralogie

Eigentlich ist schon das erste Steinbeil einer Art Mineralogie zu verdanken. Neben den Bruch Eigenschaften 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.

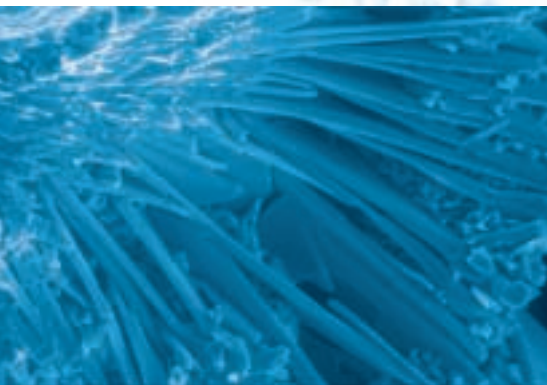
## Baustoffe gestern und heute

Schon die Römer nutzten einen Zement, der mit heutigen Produkten durchaus vergleichbar war. 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 hydrothermalen 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.

## Hightech-Keramik

ALUMINIUMOXID Natürlich sind Mineralogen auch dort zu finden, wo keramische Werkstoffe für „hoch technologische“ Anwendungen entwickelt und produziert



*Natriumsulfat in Porenbeton, ESEM-Elektronenmikroskop*



*Diamantskalpelle*

werden. Beispiele sind Kugellager, Fadenführungen bei der Tuchherstellung, Keramikrohre, ja sogar hoch belastbare körperverträgliche Kugeln aus Aluminiumoxid, die in künstlichen Hüftgelenken Verwendung finden.

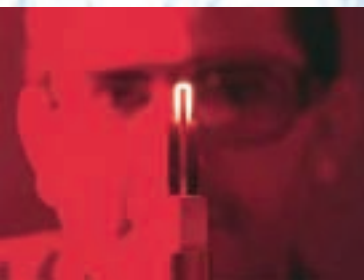


*Künstliche Hüftgelenk-  
kugel aus  
Aluminiumoxid-  
Keramik*

**SILIZIUMNITRID** Aus so gewöhnlichen Stoffen wie Silizium und Stickstoff entsteht mit mineralogischem Know-how die hoch belastbare Keramik Siliziumnitrid, die etwa in der Form von Wälzlagerkugeln bei minus 250 °C flüssigen Wasserstoff pumpen hilft und bei über 1300 °C arbeitende Turbinenschaufeln möglich macht.

**SILIZIUMCARBID** Manchmal kommt die Natur den Keramikern ganz ungewöhnlich entgegen: Ordinaire Reishülsen sind chemisch genau so zusammengesetzt, dass bei ihrer Pyrolyse unter Luftabschluss (einer Art Verkokung) feine, Millimeter lange faserförmige Kristalle (Whisker) aus Siliziumcarbid wachsen, einer hoch strapazierfähigen Keramik. In keramischen Faserbundwerkstoffen wird versucht, die besten Eigenschaften verschiedener Substanzen zusammenzufassen. So können SiC-Whisker andere Keramiken bruchzäher oder Aluminiumlegierungen widerstandsfähiger gegen hohe Temperaturen machen.

Wenn Siliziumcarbid aus geeigneten Rohstoffen zu Keramiken gesintert wird, lässt sich eine elektrisch leitende korrosionsfeste Keramik herstellen, die schroffen Temperaturwechseln standhält und so z.B. als Zündelement für Gasthermen taugt.



*Leitende SiC-Keramik  
aus Nanopartikeln*

Für die derzeit berühmteste Keramik, einen Hochtemperatur-Supraleiter aus Barium-Lanthan-Kupfer-Oxid, hat es 1987 den Nobelpreis für Physik gegeben. Einer der Empfänger, Johannes Georg Bednorz, ist Mineraloge.



*Schwebende Spielzeuggbahn  
Dank Hochtemperatur-  
Supraleiter*

## Biomineralisation

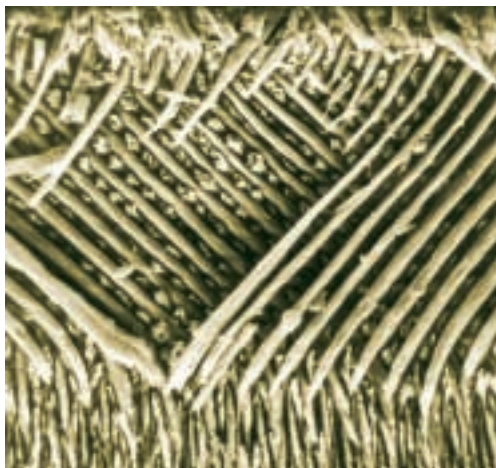
Industriekeramiken sollen künftig immer raffinierter werden. Auf der Suche nach neuen Materialien geht die Angewandte Mineralogie den Tricks der Natur auf den Grund.

*Hintergrund:  
Perlmutter-  
Gehäuse  
einer Kegel-  
schnecke*

Seeigel etwa synthetisieren 30 Zentimeter 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 Brandstand.

Plättchen aus Aragonit, 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.



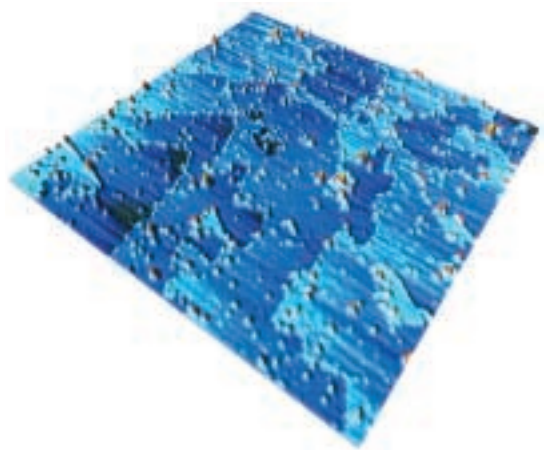
*3D-verstärkte  
Faserkeramik  
im Wühlmaus-  
zahnschmelz*

# Mineralogie und Geochemie in der Umweltforschung

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



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.

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 Mineralien 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“, 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 Rö-



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

mer die Blei-Verschmutzer waren? Die Blei-Isotopenmessung im Massenspektrometer überführt die Täter: Das  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  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. –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 praxisgerecht analysiert werden. In der Rastersondenmikroskopie-Abbildung wird z.B. gezeigt, wie sich Arsen aus Grundwasser an Eisenpartikeln festsetzt. Die Eisenpartikel wiederum haften sich

an Tonminerale an. Ausgerechnet das Grundwasser von Bangla Desh, neu erschlossene Trinkwasserquelle für die ständig steigende 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 Wirtsminerale entwickelt worden.

Aber ebenso wichtig ist die sichere Lagerung nichtradioaktiver 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.*



# Mineralogische Detektivarbeit

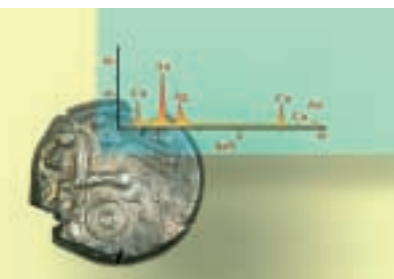
## Archäometrie

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? Aus welchem Gestein machten die Steinzeitmenschen ihre Werkzeuge? Wie entwickelten sich die Rezepturen der Glasmacher vom alten Ägypten bis heute? Welche Verhüttungsmethoden für Erze kannte man in der Vergangenheit? Fragen dieser Art lassen sich mit Hilfe zerstörungsarmer analytischer Methoden der Mineralogie einer Lösung näher bringen. Meist geht es dabei um die Untersuchung von Fundstücken zur Klärung

- der Materialzusammensetzung,
- der Herstellungstechnik und deren zeitlicher Entwicklung,
- der regionalen und zeitlichen Verbreitung bestimmter Materialien,
- der Herkunft verwendeter Rohstoffe,
- von Handelsbeziehungen,
- der Originalität (Imitationen? Fälschungen?),
- des Alters.



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

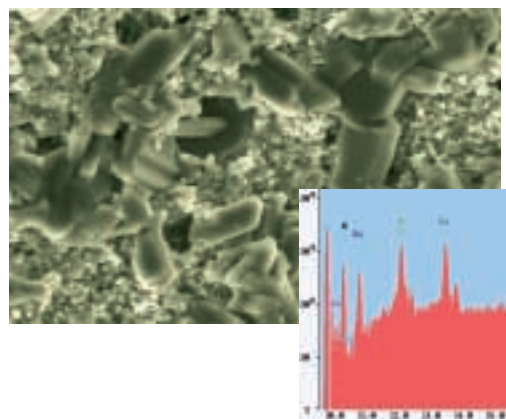
## Denkmalpflege



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

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

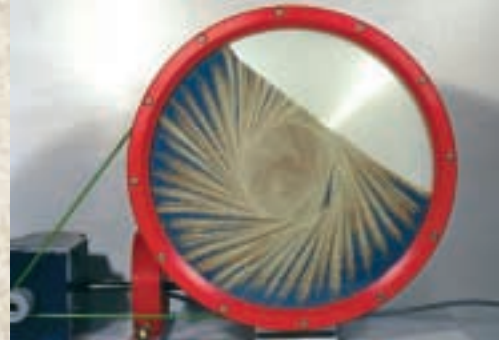
Neben der Gipskristallisation auf der Maleroberfläche – im Rasterelektronenmikroskop sichtbar gemacht – führt vor allem das Salz Nitrokalit zum Absprennen von Malschichtpartikeln. Die Zusammensetzung der Malschicht und der Korrosionsanteile wird röntgenspektrometrisch ermittelt.





# Mineralische Rohstoffe und ihre 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.

schiedene Fraktionen, mitunter frappierende Muster zerlegen; wie Partikel in Lösung Flocken bilden, Klumpen etcetera und hilft so, neue Anreicherungsverfahren zu finden und Störungen der Prozessabläufe durch Blockaden oder Produktmängel wie Verklumpungen zu vermeiden.

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 ver-



Tonminerale in ihrer schönsten Form: Die Kugelspielerin, 1898

# Mineralogiestudium an deutschen Universitäten

Das Studium des Faches Mineralogie ist an den meisten Universitäten möglich. Viele Universitäten bieten Studiengänge im Fach Mineralogie mit dem Abschluss „Diplom“ oder „Diplomingenieur“ mit 9-10 Studienplan-Semestern an. An anderen Universitäten ist das Fach in den Studiengang Geowissenschaften als Spezialisierungsrichtung integriert. Dabei gibt es sowohl Diplomstudiengänge als auch gestufte Studiengänge. Gestufte Studiengänge sind aus zwei Abschnitten aufgebaut: 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, Geologie usw. in einen mineralogischen M.Sc.-Studiengang. 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 Unis  
oder auf unserer Homepage:  
[www.dmg-home.de](http://www.dmg-home.de)

**Seite 1**, oben: Institut für Mineralogie und Geochemie der Uni Köln  
rechts oben: NASA/ESA  
rechts Mitte: Thomas Stachel, University of Edmonton, Kanada  
rechts unten: Rupert Hochleitner, Uni München  
**Seite 2**, oben: Hist. 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  
**Seite 5**, oben: STS-9 Crew, NASA  
Mitte: NASA/LPI  
rechts: NASA  
**Seite 6**, links 1,2,3: D. Hetzel, Institut für Mineralogie und Geochemie der Uni Köln;  
unten: Montage BergerhofStudios, Köln  
**Seite 7**, oben links: National Geographic/  
Renate Troyer-Berann  
unten rechts: Hans Seck, Institut für Mineralogie und Geochemie, Uni Köln  
**Seite 8**: Peter M. Herzig, Geomar Kiel  
**Seite 9**: GFZ, Potsdam  
**Seite 10**, oben: GFZ, Potsdam  
unten: NASA  
**Seite 11**: Patrick O'Brien, Uni Potsdam  
**Seite 12**, oben: Thomas Stachel, University of Edmonton, Kanada  
unten: Rupert Hochleitner, Institut für Mineralogie der Uni München  
**Seite 13**: oben rechts, Mitte: Anton Eisenhauer, Geomar Kiel  
unten: Bearbeitung: BergerhofStudios  
**Seite 14**, oben: Friedhelm von Blankenburg, Institut für Mineralogie, Uni Hannover  
Mitte: M.Burchard  
unten: ESRF, Grenoble

**Seite 15**, oben links: IBM international; Mitte rechts: Friedhelm von Blankenburg, Institut für Mineralogie, Uni Hannover  
rechts von oben: 1. Uni Greifswald;  
2.,3. Patrick O'Brien, Uni Potsdam;  
4.,5. Universität Basel; 6.,7. Ruhruniversität Bochum; 8. DESY  
**Seite 16**, oben: BergerhofStudios, Köln  
Mitte: Institut für Mineralogie und Geochemie, Uni Köln  
unten: CrystalMaker Software  
**Seite 17**, oben rechts: Institut für Mineralogie und Geochemie, Uni Köln  
Mitte: Dirk Bosbach, Forschungszentrum Karlsruhe  
unten: Schott Lithotec AG, Jena  
**Seite 18**, oben: Bauhaus-Universität Weimar  
Mitte: M. Burchard  
unten: Element Six B.V.  
**Seite 19**, oben: Hoechst AG/BergerhofStudios, Köln  
Hintergrund: BergerhofStudios, Köln  
Insert: Universität Regensburg  
links untere Mitte: INT, Saarbrücken  
unten links: IFW, Dresden  
unten rechts: Institut für Paläontologie, Uni Bonn  
**Seite 20**, oben: German Müller, Institut für Umweltgeochemie, Uni Heidelberg  
Mitte: Axel Schippers, BGR Hannover  
unten: Dirk Bosbach, Forschungszentrum Karlsruhe  
**Seite 21**: Axel Schippers, BGR Hannover  
**Seite 22**: oben links: Dieter Quest, Heimatmuseum Friedigen; darunter: K.-P. Kelber, Uni Würzburg; unten links: C.Bendall  
rechts: S. Laue, FH Potsdam, FB Architektur und Städtebau  
**Seite 23**, oben links: proaurum, München  
oben rechts: Uni Bayreuth  
unten: Staatliche Porzellan-Manufaktur, Meißen



[www.dmg-home.de](http://www.dmg-home.de)