

BIO-KRISTALLE

KRISTALL UND MENSCH

Eine Informationsbroschüre für Lehrer und Schüler zur Verwendung im projektorientierten Unterricht, sowie zum Selbststudium

Schlüsselwörter: Mineralogie
Kristallographie
Biokristallographie
Anorganische Chemie
Organische Chemie
Technische Chemie
Festkörperphysik
Geologie
Biologie
Geobiochemie
Kunst und Kristall
Kristall und Mensch

Einleitung

"Bio-Kristalle": Ist das nicht ein Widerspruch in sich selbst? Werden hier nicht allzu kühn und geradezu widernatürlich die beiden getrennten Reiche des Lebendigen (bios) und des Nicht-Lebendigen, Kristallinen (krystallos) in einem Begriff zusammengefügt? Schon nach kurzen Überlegungen wird man die Frage verneinen, weil man rasch vielfältige Beziehungen zwischen beiden Bereichen entdeckt hat und der nur scheinbare Widerspruch sich auflöst. Bei diesen Überlegungen soll diese Broschüre behilflich sein. Informationsquellen werden in Form von Literaturverweisen und Internet-Hyperlinks angeboten.

Wir werden einige sehr unterschiedliche Komplexe von Beziehungen ansprechen, von denen nicht alle körperlich-stofflicher Art sind. Ein recht ausführlich behandelter Komplex ist uralten, metaphysischen Beziehungen zwischen Menschen und Kristallen gewidmet. Dabei ist es unvermeidlich, daß der Bereich der exakten Naturwissenschaften zeitweilig verlassen wird.

Ein zweiter Komplex ist "handfester". Er behandelt unter dem Stichwort "Biomineralisation" Natur, Entstehung, Wachstum und Eigenschaften des harten Gewebes von Lebewesen, z.B. Skelette und Zähne von Wirbeltieren oder die Schalen von Muscheln und Schnecken. Nur am Rande werden weitere Komplexe, wie die Hypothese von der Entstehung des Lebens auf der Erde an bestimmten Mineraloberflächen, die Hypothese von der tiefen Biosphäre oder die Biogeochemie erwähnt. Schließlich werden einige Hinweise zur Biokristallographie gegeben. Diese moderne Wissenschaft macht es u.a. möglich, die atomare Struktur von biologisch wirksamen Molekülen, z.B. Proteinen, aufzuklären und damit zum Verständnis ihrer biologischen Funktionen beizutragen.

Bevor die einzelnen Komplexe in Angriff genommen werden können, sollte "*Kristall*" definiert und von anderen Festkörpern, insbesondere *Glas*, unterschieden werden. Dabei kommen Begriffe wie "*Periodizität*" oder "*Translationssymmetrie*", "*Punktsymmetrie*" (*Drehungen, Spiegelungen, Inversionen, Drehinversionen*), sowie "*langreichweitige und kurzreichweitige Ordnung*" zum Tragen. Schöne Einführungen in grundsätzliche Fragen der Symmetrie, hauptsächlich auf phänomenologischer, nicht-technischer Basis, findet man z.B. in den folgenden Büchern:

H. Brunner: "Rechts oder links - in der Natur und anderswo", Wiley VCH, 1999;

E. Heilbronner & J.D. Dunitz: "Reflections on Symmetry", VCH, 1993.

Die beiden im Zusammenhang mit dieser Broschüre relevanten naturwissenschaftlichen Disziplinen *Mineralogie* und *Kristallographie* können locker wie folgt beschrieben werden: Innerhalb der Geowissenschaften stellt die Mineralogie die älteste Teildisziplin dar. Sie befaßt sich mit den physikalischen Eigenschaften, der chemischen Zusammensetzung und den Bildungsbedingungen von Mineralen und Gesteinen. Für Nachbardisziplinen hat die Mineralogie grundlegende Bedeutung, da sie sowohl stoff- als auch methodenorientiert arbeitet. Wegen ihrer interdisziplinären Ausrichtung ist sie seit längerem ein wesentlicher Innovationsträger für die Materialforschung (zitiert nach http://www.min.uni-bremen.de/minpetro/fg_info.html).

Die moderne Kristallographie befaßt sich mit der Aufklärung und dem Verständnis der räumlichen Anordnung der Atome (Struktur) in der kondensierten Materie, der Entwicklung von Methoden zur Strukturaufklärung, der Untersuchung der Gesetzmäßigkeiten, mit den Änderungen des strukturellen Aufbaus, sowie mit den physikalischen, chemischen, material- und geowissenschaftlichen und technischen Eigenschaften fester Stoffe (zitiert nach <http://www.kristall.ethz.ch/DGK/>)

Weitere als Ausgangspunkte für Informationssuche nützliche Internet-Adressen sind:

<http://www.dmg.uni-koeln.de/indexv.html>;

<http://www.ifg.uni-kiel.de/~huwolter/MinLinks.html>

<http://un2sg4.unige.ch/athena/mineral/mineral.html>

<http://www.vfmg.de/>

<http://www.geo-guide.de/>

Metaphysische Beziehungen zwischen Kristall und Mensch.

Kristalle (der griechische Name krystallos wird von kryos = Eiseskälte, Frost, hergeleitet) haben vermutlich zu allen Zeiten und in vielen Kulturen als magische Symbole und als Metaphern gedient. Dabei konnten sie das Leben, den Tod, oder auch beides gleichzeitig symbolisieren.

Die ägyptischen Pyramiden sind dafür ein gutes Beispiel. Ihre geometrischen Formen gleichen riesenhaften Kristallen, deren Flächen, Kanten und Ecken sich nach den mathematischen Gesetzen der Kristallographie beschreiben lassen. Einerseits waren die Pyramiden Begräbnisstätte für die Toten, andererseits sollte den Verstorbenen durch Einbalsamierung das ewige Leben garantiert werden. Glaubte man, die Ewigkeit in dem "zeitlosen" Pyramidenkristall einfangen zu können?

Viele schöne Beispiele findet man auch in der Malerei. Ein bekanntes ist Caspar David Friedrichs bekanntes Gemälde "Eismeer oder Die verunglückte Hoffnung" (<http://www.geocities.com/SoHo/Museum/4782/ArcticShipwreck1823.jpg>). Die aufgebrochenen, dramatisch übereinander getürmten Eisschollen in der Bildmitte können leicht als Kristalle gedeutet werden. Sie stehen als traurige Symbole für den Untergang des Schiffes im lichtlosen, von der endlos weiten, einem Leichentuch gleichenden, Eiswüste bedeckten Meer. Dagegen entströmt den Kristallen im Vordergrund ein "überirdisch" warmes Licht und verkündet Hoffnung, Trost, Versöhnung und ein neues, geistiges Leben.

P. Rautmann: C.D. Friedrich. Das Eismeer. Durch Tod zu neuem Leben, Frankfurt/Main, 1991

Ein anderes, dem Verfasser sehr liebes, Beispiel ist das Gemälde "Ein Kristall, seine Witwe und sein Kind" von Max Ernst. Offensichtlich sind hier Tod und Leben bereits im Titel vereinigt. Um etwas über diesen Künstler zu erfahren, kann man sich folgender Internet-Adresse bedienen:

<http://www.artchive.com/artchive/E/ernst.html>

Eine preisgünstige Einführung in Leben und Werk des Künstlers in Buchform ist 1999 bei Taschen erschienen: "Max Ernst" von U. Bischoff.

Wir wollen es bei diesen beiden Beispielen bewenden lassen, nennen aber im folgenden für den interessierten Leser einige mögliche Startpunkte für weitergehende Recherchen. Die aufgeführten Referenzen wurden dem Katalog zur Ausstellung "Kristall - Metapher der Kunst - Geist und Natur von der Romantik zur Moderne", 31.08. - 16.11.1997, Lyonel-Feininger-Galerie Quedlinburg, entnommen, der auch eine Abbildung von Max Ernsts "Kristall" enthält.

- R. Prange: Das Kristalline als Kunstsymbol. Bruno Taut und Paul Klee. Zur Reflexion des Abstrakten in Kunst und Kunsttheorie der Moderne, Hildesheim/Zürich/New York, 1991.
- Ausstellungskatalog: Faszination Edelstein. Aus den Schatzkammern der Welt. Mythos, Kunst, Wissenschaft Landesmuseum Darmstadt 1992 (Bern 1992)
- Ausstellungskatalog: Goethe und die Kunst, hrsg. Von S. Schulze, Schirn-Kunsthalle, Frankfurt/Main (Stuttgart, 1994)
- Ausstellungskatalog: La Transparence dans l'Art du XX^e Siècle, hrsg. Von F. Cohen, Musée des Beaux-Arts André Malraux, Le Havre 1995 (Paris 1995)
- H. Böhme: Das Philosophische Licht und das Licht der Kunst, in: Parkett 38/1993 S. 8-15
- M. Bushart: Der Geist der Gotik und die expressionistische Kunst. Kunstgeschichte und Kunsttheorie 1911-1925, München 1990
- F. Cramer/W. Kaempfer: Die Natur der Schönheit. Zur Dynamik der schönen Formen, Frankfurt/Main 1992
- V. Kuni: Die Sprache der Steine. Vom Kunstsymbol zum Katalysator künstlerischer Imagination: Kristallwelt, Materie und Steinreich im Surrealismus, in Ausst.Kat. Die Erfindung der Natur. Max Ernst, Paul Klee, Wols und das surreale Universum, hrsg. Von K. Orchard und J. Zimmermann, Sprengel-Museum Hannover, Badischer Kunstverein Karlsruhe, Rupertinum Salzburg 1994 (Freiburg im Breisgau 1994)
- A.Oltmann: Das Amorphe und das Kristalline als Begriffspaar bei Beuys. In: Joseph Beuys Symposium Kranenburg 1995, Basel 1996, S. 73-78
- K.-D. Pohl: Der Kristall im Werk von Joseph Beuys. Frühe Arbeiten - ein Überblick, in: Vorträge zum Werk von Joseph Beuys, Darmstadt 1995, S. 19-34
- D.Hoffmann/K.Ermert: Die Sachen und ihre Schatten. Über Symbole und Symbolisierungen in Kunst und Wissenschaft. (Loccum Protokolle 1/1991), Evangelische Akademie Loccum, Rehberg 1991.
- G. Kohlmaier/B. v. Sartory: Das Glashaus. Ein Bauhaustyp des 19. Jahrhunderts, München 1996
- R. Prange: Das Kristalline, in Ausst. Kat. Ernste Spiele. Der Geist der Romantik in der deutschen Kunst 1790 - 1990. Hrsg. Von C. Vitali, Haus der Kunst, München 1995 (Stuttgart 1995), S. 608-615
- P. Rautmann: C.D. Friedrich. Das Eismeer. Durch Tod zu neuem Leben, Frankfurt/Main, 1991
- H. Sedlmayr: Die Entstehung der Kathedrale. Freiburg/Basel/Wien 1993
- A.Thiekötter u.a.: Kristallisationen, Splitterungen. Bruno Tauts Glashaus. Werkbund-Archiv Berlin, Institut Mathildenhöhe Darmstadt, Karl Ernst Osthaus-Museum Hagen 1993/94 (Basel 1993)
- I. B. Whyte/R. Schneider: Die Gläserne Kette. Eine expressionistische Korrespondenz über die Architektur der Zukunft, Stuttgart 1996

Eis ist gefrorenes, d.h. kristallisiertes Wasser. Vom mineralogisch-kristallographischen Standpunkt aus gesehen, sind Eisschollen dichte Aggregate von vielen miteinander verwachsenen und darum unregelmäßig geformten Eiskristallen. Perfekte Kristalle lassen sich unter den Schneeflocken finden. Deren oft außerordentlich ästhetische Form hat viele Menschen fasziniert, manche von ihnen gingen so weit, daß sie ihr Leben dem Studium von Schneekristallen verschrieben. So auch W. A. Bentley, der während einiger Jahrzehnte Zehntausende von Schneeflocken fotografierte und weit über 2000 der schönsten und interessantesten Fotos veröffentlichte:

W.A. Bentley & W.J. Humphreys: Snow Crystals, Dover Publications, 1962,

siehe auch <http://snowflakebentley.com/>

Gut erarbeitetes Informationsmaterial über die Struktur des Eises, sowie über das Wachstum und die Morphologie von Eiskristallen findet man in:

<http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/>

Eiskristalle, bzw. Schneeflocken, sind Gegenstand einer berühmten Literaturszene geworden. Im "Zauberberg" beschreibt Thomas Mann die Empfindungen seines Helden beim Betrachten von Schneekristallen: *"...unter den Myriaden von Zaubersternchen in ihrer untersichtigen, dem Menschaugen nicht zugedachten, heimlichen Kleinpracht war nicht eines dem anderen gleich; eine endlose Erfindungslust in der Abwandlung und allerfeinsten Ausgestaltung eines und immer desselben Grundschemas, des gleichseitig-gleichwinkligen Sechsecks, herrschte da; aber in sich selbst war jedes der kalten Erzeugnisse von unbedingtem Ebenmaß und eisiger Regelmäßigkeit, ja, dies war das Unheimliche, Widerorganische und Lebensfeindliche daran; sie waren zu regelmäßig, die zum Leben geordnete Substanz war es niemals in diesem Grade, dem Leben schauderte vor der genauen Richtigkeit, es empfand sie als tödlich, als das Geheimnis des Todes selbst, und Hans Castorp glaubte zu verstehen, warum Tempelbaumeister der Vorzeit absichtlich und insgeheim kleine Abweichungen von der Symmetrie in ihren Säulenordnungen angebracht hatten."* (Th. Mann: "Der Zauberberg". Fischer Taschenbuch Verlag, 1987, S. 505).

Für den im letzten Satz erwähnten absichtlichen Bruch der Symmetrie lassen sich ohne große Mühe viele weitere Beispiele aus den unterschiedlichsten Bereichen nennen. So findet man in vielen Gemälden und anderen Kunstwerken ebenfalls bewußte Abweichungen von der idealen Symmetrie. Raffaels "Schule von Athen" (<http://un2sg4.unige.ch/athena/html/athome.html>; G. Mazzola, D. Krömker, G.R. Hofmann: Rasterbilder - Bildrastrer: Anwendung der Graphischen Datenverarbeitung zur geometrischen Analyse eines Meisterwerks der Renaissance: Raffaels >Schule von Athen<, Springer, 1987) ist dafür nur ein

Beispiel. Ein Symmetriebruch verleiht dem Kunstwerk erhöhte innere Spannung und gibt ihm Dynamik, was wiederum die Wirkung auf den Betrachter verstärkt. Der Bedeutung des Symmetriebruchs in Kunst und Natur geht T. Mayer-Kuckuk in "Der gebrochene Spiegel", Birkhäuser, 1989, nach.

Ein Beispiel aus einem ganz anderen Bereich ist die in einigen Kulturkreisen verbreitete Sitte schöner Damen, die perfekte Links-Rechts-Symmetrie ihres Gesichtes durch einen geschminkten Schönheitsfleck ganz leicht zu verletzen, wobei natürlich die Idealform noch ohne weiteres erkennbar bleiben muß. Sicher soll dadurch beim Gegenüber der Eindruck lebendiger Schönheit auf Kosten kalter Symmetrie verstärkt werden.

Offensichtlich assoziiert T. Mann im obigen Text Leben mit Symmetriebruch, die perfekte Symmetrie der Kristalle aber mit dem Tod. Ohne dem Dichter nahe treten zu wollen, wagen wir doch zu fragen, ob man im Zusammenhang mit Kristallen nicht genauer von "Nicht-Leben" statt vom "Tod" sprechen sollte. Es gibt doch einen wesentlichen Unterschied zwischen dem "Tod" eines Kristalls, und dem Tod eines lebendigen Wesens. Weil der Kristall nicht das Schicksal alles Lebendigen teilt, nämlich zum Sterben geboren zu sein, ist sein "Tod" von gänzlich anderer Art. Der Kristall hat kein Leben vor dem Tod, er kann daher weder altern noch verwesen, er ist mit anderen Worten zeitlos.

Aus realer Erfahrung wissen wir, daß dies eine idealisierende Aussage ist und manche Kristalle und Minerale im Laufe der Zeit verwittern und zerfallen (Man suche Beispiele!). Auch weiß man, daß kein Kristall bei allen Temperaturen und Drücken stabil bleibt (Beispiele?). Das ist aber im Kontext unserer kurzen Betrachtung über die metaphysischen Beziehungen zwischen Kristallen und Menschen unwesentlich und wird hier ignoriert.

Einige Kristallarten haben besonders geschätzte Eigenschaften, z.B. große Härte, schöne Farbe, hohe Lichtbrechung und Dispersion und heißen daher Edelsteine. Wenn einzelne Kristallindividuen sich dann noch zusätzlich durch ihre Reinheit, Klarheit, d.h. Abwesenheit von Rissen oder Ausscheidungen, und Größe auszeichnen, was nur selten vorkommt, werden sie zu begehrten Kostbarkeiten.

Kunstgerecht zu einem Juwel geschliffen, verleiht das Funkeln und Glitzern einem Edelstein eine weit über sein eigentliches Volumen hinaus reichende Aura und läßt an überirdische

Lichtgebilde denken. Nicht zuletzt aus diesem Grund haben Edelsteine und andere Kristalle von jeher die Menschen aller Völker fasziniert und einen bedeutenden Platz in ihren Religionen, Riten, Märchen, Sagen und Mythen eingenommen.

Ph. Schmidt: "Edelsteine - Ihr Wesen und ihr Wert bei den Kulturvölkern". Bonn, 1948

Ein Autor des 19. Jahrhunderts hat das poetisch so ausgedrückt:

"Aristipp der Sokratiker, als er durch einen Schiffbruch an das Gestade von Rhodus geworfen, gezeichnete geometrische Figuren bemerkte, soll gegen seine Gefährten so ausgerufen haben: fassen wir gute Hoffnung, denn ich sehe Spuren von Menschen! - Was soll der Gebirgsforscher sagen, wenn ihm auf ernster Wanderung im öden Gebirg klare Crystalle entgegenleuchten? Nicht auch: fasse gute Hoffnung, denn ich sehe Spuren Gottes. Tröstende Spuren der ewigen Weisheit, ihr in der einsamen, stillen Nacht der Vorzeit vor Menschen Gedenken und Gedanken gebildete wundervolle Steine, in eure Schönheit vertieft sich der Mensch, der Spätling".

Karl von Raumer: "Vermischte Schriften", Teil II, S. 126, Berlin, 1822

Auch Paracelsus konnte sich dem Zauber der Edelsteine nicht entziehen, für ihn waren sie die höchste Subtilität der Natur.

Die Edelsteinkunde oder Gemmologie ist ein sehr angesehener und auch wirtschaftlich wichtiger Zweig der Mineralogie. Basisinformationen und nützliche Links dazu findet man unter

<http://www.uni-mainz.de/FB/Geo/mineralogie/gemstone/>

Bevor wir nun zu rein naturwissenschaftlichen Fragestellungen übergehen, soll noch einen anderer Aspekt kurz angesprochen werden. Dies betrifft die gegenwärtig weit verbreitete, sogenannte Esoterik. Unter diesem Namen versteht man eine Ansammlung von nicht den Naturwissenschaften angehörenden Lehren, in denen u.a. Edelsteinen magische Kräfte, heilende Wirkung oder andere Einflüsse auf den Menschen zugeschrieben werden (siehe hierzu http://www.reikibuch.de/edelsteine_indikat.html).

Es ist wichtig zu wissen, daß derartige Lehren mit den streng logischen Regeln der klassischen Naturwissenschaften nicht kompatibel sind.

Biominalisation

Der Körper eines größeren Lebewesens braucht stützendes Gewebe. Während die ortsfesten Pflanzen sich weitgehend auf die organische Cellulose verlassen und z.B. Insekten in einem Panzer aus Chitin Halt und Schutz finden, bestehen die Knochen, aber auch Zähne der Wirbeltiere, die Schalen von Muscheln und Schnecken, die Skelette der Korallen, Radiolarien und Diatomeen und auch die Schulp von Tintenfischen hauptsächlich aus anorganischen Substanzen, d.h. Mineralen. Diese kommen meistens in kristalliner Form vor.

Das Skelett des Menschen macht etwa 1/5 seines Gesamtgewichts aus. Das gilt so oder ähnlich auch für andere Wirbeltiere. Da organisches Gewebe sehr schnell verwest, bleiben nach dem Tod eines Lebewesens hauptsächlich die mineralischen Feststoffe seines Körpers übrig. Auf deren Bestimmung beruht zu einem großen Teil das geologische Teilgebiet Paläontologie. Gelegentlich können die mineralischen Überbleibsel von abgestorbenen Lebewesen in solch großen Mengen auftreten, daß sie ganze geologische Formationen und Gebirge zu bilden imstande sind. Man denke nur an die gewaltigen, aus Kreide bestehenden Steilklippen in Rügen, an die in den erdgeschichtlichen Formationen des Tertiärs und Quartärs gebildeten manchmal 50 und mehr Meter mächtigen Ablagerungen der kieseligen Zellwände von Diatomeen oder an den weite Teile des heutigen Tiefseebodens bedeckenden Schlamm, der aus den Kieselsäure-Skeletten der Radiolarien (= Strahlentierchen) besteht. Wenn sich dieser Schlamm im Laufe von Jahrmillionen verfestigt, entsteht ein sehr hartes Gestein, genannt Radiolarit. Im Paläozoikum, der Frühzeit der Erde, entstandene Radiolarite sind häufig durch kohlige Einlagerungen dunkel gefärbt, sie heißen dann Lydit. Vorzeitliche Korallenriffe lassen sich zum Beispiel in den gewaltigen Gebirgsstöcken der Dolomiten nachweisen.

Die anorganische Substanz in den Knochen und Zähnen der Wirbeltiere, auch des Menschen, besteht Kristallen von Hydroxylapatit, während Muschelschalen im wesentlichen aus Calcit und Aragonit, zwei kristallinen Modifikationen des Calciumcarbonats, bestehen. Die betreffenden Kristalle sind dabei geordnet in einer Matrix aus Proteinen und Kollagenfasern eingebettet. Es handelt sich bei dem körperlichen Hartgewebe um einen bio-anorganischen "*Komposit*", wobei dieses Wort ein aus mehreren Komponenten bestehendes Material bezeichnet. Aus dem Alltagsleben sind Komposite z.B. als Verbundwerkstoffe bekannt. Eine Einführung in die "Kristallographie" von Kompositen ist

Der Komposit-Charakter muß berücksichtigt werden, wenn man die Entstehung, das Wachstum und die Eigenschaften beispielsweise von Knochen überhaupt verstehen will. Auch Techniker und Ingenieure schätzen Komposite, deren Eigenschaften sich generell nicht durch einfache Addition der Eigenschaften der Komponenten ergeben, sondern stark davon abweichen können. Sowohl die Natur, als auch der Ingenieur, streben an, beim Aufbau eines Komposits die erwünschten Eigenschaften der Komponenten beizubehalten oder besser noch zu verstärken, eventuelle Schwächen der einen Komponente aber durch die Stärke einer anderen auszugleichen.

Man denke beispielsweise an Muschelschalen. Hier bilden die spröden, leicht zu spaltenden und relativ weichen Kristalle des Minerals Aragonit im Verbund mit weicher organischer Substanz sehr harte, extrem belastbare Gehäuse. Eierschalen sind ebenfalls verhältnismäßig stabil, zumal wenn man weiß, daß ihre anorganische Komponente aus Calcit besteht. In Knochen und Zähnen ist das Mineral Hydroxylapatit eingebaut. Wenn man die Eigenschaften des reinen Minerals kennt, ist das gebildete Kompositmaterial überraschend elastisch, bzw. bei den Zähnen schneidend scharf. Diese Komposite sind ihrer jeweiligen biologischen Funktion hervorragend angepaßt.

Man muß sich dabei noch vor Augen halten, daß diese Materialien im Körper selbst gebildet werden und mit diesem wachsen müssen. Es ist klar, daß dies unter genetischer Kontrolle stattfinden muß.

Obwohl wichtige Grundlagen dieser Prozesse bereits verstanden sind, fehlen uns immer noch viele Informationen, so daß von einem umfassenden Verständnis noch nicht die Rede sein kann. Daß es sich bei diesen Problemen um ein aktuelles Forschungsthema handelt, zeigt die Tatsache, daß zur Zeit der Abfassung dieser Zeilen (Oktober 2000) ein Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft zum Thema "*Biominalisation*" anläuft. Zitat aus dem Aufruf:

"Ziel des Schwerpunktprogramms ist die Aufklärung der grundlegenden Prozesse der Bildung anorganischer Festkörper durch Lebewesen. Dies soll durch intensive Zusammenarbeit von Arbeitsgruppen aus den Bereichen der Anorganischen und der Analytischen Chemie (auch Mineralogie und Kristallographie, d. Verf.) mit biologisch und biochemisch ausgerichteten Arbeitsgruppen erreicht werden. Im Zentrum der Fragestellungen des Programms stehen der Aufbau der molekularen biochemischen Matrix und ihre genetisch kontrollierte Bildung, der biologische Transport anorganischer Precursor-Species, die Keimbildung anorganischer Festkörper auf biologischen Matrices, das kontrollierte Wachstum anorganischer Festkörper,

die biologisch kontrollierte Ausbildung hierarchisch geordneter Aggregate, sowie die Strukturen und Funktionen des bioorganisch-anorganischen Komposits."

Wir erwähnen eher beiläufig, daß der Körper auch fähig sein muß, die äußere Form der anorganischen Kristalle, d.h. deren Morphologie, zu kontrollieren. Man stelle sich vor, daß die normalerweise kurz-prismatischen Hydroxylapatitkristalle in den menschlichen Zähnen aus irgendeinem Grund langgestreckt wären oder, wie man sagt, ein größeres Aspektverhältnis hätten. Man begreift intuitiv, daß dadurch die mechanische Festigkeit der Zähne herabgesetzt wäre und sie ihre normale Funktion des Beissens und Kauens nur noch eingeschränkt ausüben könnten. So etwas könnte ein Problem für Hersteller von Zahnpasten darstellen, wenn sie ihren Produkten Stoffe beimischen, die vom Körper aufgenommen und in den Zähnen wieder abgelagert werden.

Die Anzahl unterschiedlicher Minerale, die im Hartgewebe tierischer oder pflanzlicher Körper auftauchen, ist relativ gering. Im folgenden werden einige der wichtigsten aufgeführt.

Calciumcarbonat, CaCO_3 , kristallisiert in drei verschiedenen Modifikationen, nämlich *Calcit*, *Aragonit* und *Vaterit*. Während Vaterit eher eine untergeordnete Rolle spielt, kommen Calcit und Aragonit z.T. in wechselnden Verhältnissen in Vogeleienschalen, Muscheln, Schnecken Korallen, und gewissen Stachelhäutern vor. Die als Schmuck geschätzten edlen Perlen bestehen aus Aragonit. Dieser löst sich in verschiedenen Säuren, weshalb ein Perlenhalsband möglichst nicht in Essig fallen sollte.

Informationen über die Calciumcarbonat-Mineralie lassen sich leicht in klassischen Lehrbüchern der Mineralogie, Kristallographie oder Chemie finden, die hier aber nicht mit aufgeführt sind. Andere Fundstellen sind:

<http://www.recipnet.indiana.edu/common/Minerals/calcite/calcite.htm>

<http://encarta.msn.com/index/conciseindex/56/05616000.htm>

<http://mineral.galleries.com/minerals/Carbonat/CALCITE/CALCITE.htm>

<http://encarta.msn.com/find/Concise.asp?z=1&pg=2&ti=761554762&hs=Bivalve>

<http://encarta.msn.com/find/Concise.asp?z=1&pg=2&ti=761577419&hs=Pearl>

<http://mineral.galleries.com/minerals/Carbonat/ARAGONIT/ARAGONIT.htm>

Calcit gilt als das Mineral mit der variabelsten Morphologie. Siehe hierzu unter anderem die schöne Broschüre

ExtraLapis No. 14: Calcit - Das formenreichste Mineral der Erde. Christian Weise Verlag, München, 1998.

Dieses sehr häufige Mineral wird leicht durch kohlenensäurehaltiges Wasser aufgelöst, aber auch schnell wieder abgeschieden. Durch solche Vorgänge können ganze Landschaften umgestaltet werden. Unter ihrem Einfluß bilden sich bizzare Felsformationen, Karst, Tropfsteinhöhlen und Sinterablagerungen sind ihre Folge. Man überlege, ob diese Eigenschaften in irgendeiner Weise Einfluß auf den Menschen oder anderes Leben gehabt haben könnten. Welche Rolle spielt dabei das jeweils herrschende Klima?

Die mineralischen Hauptbestandteile der Knochen und Zähne gehören zur Apatitgruppe, einer Gruppe phosphathaltiger Calciumminerale. Genauer gesagt handelt es sich dabei um den sogenannten *Hydroxylapatit*, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$. Der eng damit verwandte *Fluorapatit*, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, ist chemisch weniger anfällig als die OH-Variante, weshalb viele Zahnpasten Fluoridzusätze enthalten in der Hoffnung, daß die Fluoridionen die OH-Ionen des Hydroxylapatits nach und nach ersetzen und die Zähne damit widerstandsfähiger werden.

Weitere Informationen über Apatit:

<http://mineral.galleries.com/minerals/Phosphat/APATITE/APATITE.htm>

<http://www.minerals.net/mineral/phosphat/apatite/apatite.htm>

Siliciumdioxid, Silica, kristallisiert in einer ganzen Reihe von verschiedenen Modifikationen, von denen die bekannteste der *Quarz* ist. Neben den kristallinen Strukturen gibt es auch mikrokristalline und amorphe Formen. Über die weiter oben angegebenen allgemeinen Links läßt sich problemlos Eingang in die sehr umfangreiche Literatur finden. In tierischen Lebewesen tritt Silica vor allem in den bereits erwähnten *Radiolarien* oder Strahlentierchen auf. Ein nützlicher Link dazu ist <http://www.chemistry.mcmaster.ca/faculty/brook/rad.html>

Die außerordentliche Eleganz und Schönheit der Kieselskelette von Radiolarien hat einen der größten Biologen des ausgehenden 19. Jahrhunderts, Ernst Haeckel, zu einem seinerzeit äußerst erfolgreichen Buch mit eigenen Zeichnungen inspiriert, das heute wieder als Nachdruck erhältlich ist und noch immer Bewunderung hervorruft:

Ernst Haeckel: Kunstformen der Natur. Prestel, 1998.

Die Abbildungen sind vollständig auch im Internet unter der Adresse

<http://www.mpiz-koeln.mpg.de/~stueber/haeckel/kunstformen/natur.html>

zu finden.

Auch Kieselalgen, oder *Diatomeen*, wurden bereits früher erwähnt. Wer mehr darüber lernen möchte und einer Diskussion über die strukturellen, biologischen und energetischen Aspekte der Mineralisationsprozesse folgen will, sei dringend auf diesen sehr lohnenden Übersichtsartikel verwiesen:

D. Volkmer: Von Biomineralien zu biomimetischen Materialien: Der Weg ist das Ziel. *Chemie in unserer Zeit* 33, 6 - 19 (1999).

Zwei etwas ältere Übersichtsartikel, die aber die einschlägige Literatur bis zum Erscheinungsdatum gut abdecken, sind

C.M. Zaremba & G. D. Stucky: Biosilicates and biomimetic silicate synthesis. *Current Opinion in Solid State & Materials Science* 1, 425 - 429 (1996)

G. K. Hunter: Interfacial aspects of biomineralization. *Current Opinion in Solid State & Materials Science* 1, 430 - 435 (1996)

Viele Pflanzen, Gräser zumal, enthalten SiO_2 . Bei *Brennesseln* verleiht diese Substanz den Brennhaaren ihre Sprödigkeit. Bei Berührung brechen sie ab und injizieren ihren ätzenden Inhalt in die Haut.

Reishülsen enthalten ebenfalls große Mengen SiO_2 . Da durch Reisschälen enorme Abfallmengen anfallen, muß man nach sinnvollen Verwertungsmöglichkeiten suchen. Es ergab sich, daß das Mengenverhältnis von Silicium zu Kohlenstoff und die Größenverteilung der Teilchen sehr gut für die Herstellung von *Carborund*, SiC , geeignet ist, weil die benötigte Brenntemperatur erheblich unter der des Normalverfahrens liegt. Dadurch lassen sich erhebliche Energiemengen einsparen. Carborund ist sehr hart und findet in großen Mengen als Schleifmittel Verwendung.

Von einigen *Flechten* ist bekannt, daß sie lithophil, also geradezu Steinfresser sind. Dabei wird in einigen Fällen an der Grenzschicht zwischen Flechtenkörper und Stein SiO_2 in Form von Quarz abgeschieden

H. Pentinghaus: Korrosion von Mansfelder Kupferschlacken durch die Flechte *Lecanora polytrapa*. *Ber. Dt. Miner. Ges.* 1, 147 (2000).

Dabei ist bemerkenswert, daß es ein Lebewesen fertig bringt, Quarz bei Normalbedingungen entstehen zu lassen. Technisch ist der Mensch dazu (noch) nicht in der Lage, er braucht für seine Synthesen wesentlich härtere Bedingungen. Das gilt beispielsweise auch für die Synthese der technisch wichtigen *Zeolithe*:

<http://www.iza-structure.org/databases/>

Gallen-, Nieren-, Blasensteine

Ausgesprochen lästige Produkte einer Biomineralisation sind die verschiedenen Gallen-, Nieren- oder Blasensteine im Menschen. Ihre Anwesenheit und Abgang kann zu gefährlichen Störungen der Gesundheit führen und von teils heftigsten Schmerzen begleitet sein. Die Ursachen ihrer Bildung sind vielfältig, ebenso wie die Therapie. Manchmal genügt eine Anpassung der Ernährungsgewohnheiten, in schweren Fällen muß operiert werden. Falls möglich, wird heutzutage gern die Lithotripsie eingesetzt, bei der die Steine durch akustische Stoßwellen zertrümmert werden. Daß seelische Erregungszustände für das Auftreten oder Lösen von Steinen zumindest mitverantwortlich sein können, belegt der Ausdruck "das geht mir an die Nieren". Die meisten Steine bestehen aus Calciumoxalat, mineralogisch *Whewellit*. Häufig treten auch Harnsäure und Magnesiumphosphatsteine (*Struvit*) auf.

<http://netdokter.at/Krankheiten/Fakta/nierensteine.htm>

<http://www.unileoben.ac.at/~vr3/zeitung/zeitung5.htm>

Bio-Magnetismus

Verschiedene Tierarten, darunter Brieftauben, Zugvögel und einige Fischarten, orientieren sich am erdmagnetischen Feld. Ein entsprechendes Sinnesorgan konnte bisher aber nur in wenigen Fällen gefunden werden. Anders bei einer Reihe von sogenannten magnetotaktischen Bakterien, die sich ebenfalls am Erdmagnetismus orientieren. Der Sensor ihres magnetisch empfindlichen Organs besteht aus winzigen ferromagnetischen Kristallen des Minerals *Magnetit*, Fe_3O_4 .

<http://www.geophysik.uni-muenchen.de/Institute/Geophysik/biomag.htm>

Interessanterweise gibt es auch in der Technik Bestrebungen, für magnetische Datenspeicher sehr kleine Kristalle mit Abmessungen im Nanometer-Bereich, sogenannte *Nanokristalle*, einzusetzen, weil hier das Problem der magnetischen Domänen weitgehend entfällt.

J.H. Fendler: Biomineralization inspired preparation of nanoparticles and nanoparticulate films. *Current Opinion in Solid State & Materials Science* 2, 365 - 369 (1997)

Biogeochemie

Eine der modernen Entwicklungen im Bereich der naturwissenschaftlichen Forschung ist es, mehr und mehr die Grenzen zwischen etablierten Disziplinen zu überschreiten, d.h. interdisziplinär zu arbeiten. In diesen Rahmen paßt auch die Biogeochemie. Das Wechselspiel

zwischen Lebewesen und Geosphäre ist in der Tat überaus intensiv, wobei hier nur Stichworte angegeben werden sollen.

<http://www.mpi-bremen.de/deutsch/mikrobio/sschnell/sschnell.html>

Bodenbildung ist ohne Mithilfe von Mikroorganismen nicht denkbar, viele *Erzlagerstätten* sind bakteriogener Herkunft, wobei insbesondere auch die unterseeischen Hydrothermalschlote ("*Black Smokers*") von Interesse sind. Die an solche Hydrothermalschlote gebundenen Ökosysteme stoßen bei vielen Biologen auf großes Interesse, weil diese ohne Sauerstoff auskommen.

Kohle, als zu Stein gewordene organische Substanz, ist sicherlich in der Biogeochemie anzusiedeln, vielleicht auch Erdöl.

Eine seit einigen Jahren populäre Spekulation vermutet, daß die Lithosphäre bis zu einigen hundert Metern Tiefe durch Mikroorganismen besiedelt sein könnte (*Deep Hot Biosphere*):

<http://www.people.cornell.edu/pages/tg21/DHB.html>

<http://store.yahoo.com/scibook/deephotbios.html>

Sollte sich das bewahrheiten, bestände die Möglichkeit, daß Erdöl ständig neu erzeugt wird.

Seit langem bewegt die Menschheit die Frage, wie das Leben auf der Erde entstanden sein könnte. Eine immer wieder vorgebrachte Hypothese besagt, daß die ersten sich reproduzierenden Moleküle auf den regelmäßigen Strukturen gewisser Minerale entstanden sein könnten. Viele mit dieser Grundidee verknüpfte philosophische und naturwissenschaftliche Probleme werden in der August 1997 Ausgabe des *Journal of Theoretical Biology* (<http://www.idealibrary.com/links/toc/jtbi/187/4/0>) diskutiert, die auch den wichtigen Artikel von Günter Wächtershäuser: *Origin of Life and its Methodological Challenge* (*J. Theor. Biol.* 187, 483-494, 1997) enthält. Weitere Literatur- und Internet-Verweise sind:

Paecht-Horowitz, M.: Die Entstehung des Lebens. *Angew. Chem.* 10, 422-429 (1973)

Weiss, A.: Replikation und Evolution in anorganischen Systemen. *Angew. Chemie.* 93, 843-854 (1981)

Carins-Smith, A. G. & Hartmann, H. (eds.) *Clay minerals and the origin life.* Cambridge University Press, 1996.

Ferris, J. P. & Ertem, G.: Oligomerization of ribonucleotides on montmorillonite: reaction of the 5'-phosphorimidazolide of adenosine. *Science* 257, 1387-1389 (1992)

Bujdak, J. et al.: Peptide chain elongation: a possible role of montmorillonite in prebiotic synthesis of protein precursors. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 25, 431-441 (1995)

Bujdak, J.: The effect of reaction conditions on montmorillonite-catalysed peptide formation. *Catalysis Letters* 37, 267-272 (1996)

Bujdak, J. et al.: Investigation on the mechanism of peptide chain prolongation on montmorillonite. *Inorg. Biochem.* 61, 69-78 (1996)

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/2948/orgel.html>

<http://scienceweek.com/swfr009.htm>

<http://www.nap.edu/books/0309064260/html/3380.html>

<http://alife.co.uk/crystals/>

<http://www.scitec.auckland.ac.nz/~king/Preprints/book/biocos/life/life.htm>

BIOKRISTALLOGRAPHIE

Dies ist ein sehr aktives Teilgebiet der Kristallographie und stellt gleichzeitig das Arbeitspferd der *Molekularbiologie* dar. Dabei geht es darum, mit Beugungsmethoden zu bestimmen, wo sich die Atome in einem Kristall befinden. Wenn das gelungen ist, kann aus der Struktur auf die biologische Funktion geschlossen werden. Weil biologische Strukturen, etwa *Proteine*, üblicherweise eine sehr große Anzahl von Atomen enthalten, unterscheiden sich die Methoden der *Biokristallographie* von denen der Kristallographie kleiner Moleküle oder anorganischer Substanzen. Ein oft nur schwer zu überwindendes Hindernis besteht darin, geeignete Kristalle für die Röntgenuntersuchungen und Strukturbestimmungen zu erhalten.

Die folgenden Webseiten sowie das unten angeführte Buch liefern schön illustrierte Einführungen in die verschiedenen Aspekte der Proteinkristallographie:

(1) Generelle Einführung:

<http://www-structure.llnl.gov/Xray/xrayprimer.html>

Ziel der Proteinkristallographie; Methoden von der Kristallisation bis zur Strukturlösung und -interpretation; separate Kapitel über kristallographische Grundlagen (wie etwa die Ewald-Konstruktion); Dia-Show

<http://denise.pharm.uwa.edu.au/Intro.htm>

Sehr kurzer Überblick

Proteindatenbank mit vielen Links zu Biokristallen:

<http://www.rcsb.org/pdb/>

(2) Graphische Darstellungen von biomolekularen Strukturen:

<http://www.umass.edu/microbio/rasmol/teacher2.htm>

3D-Modelle für Sekundärstruktur und eine Reihe von Proteinstrukturen; Download von Protein Data Bank (PDB Lite) etc.

<http://molvis.sdsc.edu/visres>

Weltweiter Index der biomolekularen Visualisationsquellen

http://bocklabs.wisc.edu/movies/r14_ico.html

Strukturmodell des Schnupfenvirus

(3) Vertiefung der Methoden:

<http://ysb1.york.ac.uk/~mgwt/thesis-tth/chapter2.html>

Methoden der Proteinkristallstrukturanalyse

http://www.bmsd.washington.edu/Scatter/AS_index.html

Lösung des Phasenproblems mit anomaler Streuung

(4) Anwendung der Strukturinformation auf Rational drug design:

<http://cem.msu.edu/~parrill/design/ligandsbound.html>

Beispiel der Bindung von Liganden an ein Enzym (HIV-Protease)

(5) Literatur:

Carl Branden & John Tooze: Introduction to Protein Crystallography,

Garland Publ., 2nd ed., NY 1999 (Paperback)

Y.A. Muller & U. Heinemann: Röntgenstrukturanalyse großer Biomoleküle. Chemie in unserer Zeit 32, 22 - 33 (1998)

Kiel, Oktober 2000

Prof. Dr. W. Depmeier, Universität Kiel, Institut für Geowissenschaften, -
Mineralogie/Kristallographie -, Olshausenstr. 40, 24098 Kiel

TEL 0431 880 2839 FAX 0431 880 4457 EMAIL wd@min.uni-kiel.de
