

**Klausurersatzleistung der Lehrveranstaltung
Angewandte Mineralogie
SS 2004**

Kristallbildung in Organismen



Hausarbeit als Klausurersatz der LV „Angewandte Mineralogie I“ 0632 L501

Thema: Kristallbildung in Organismen

Dozent: Hösch

Bearbeiterin: Josepha Kempl

Matr.-Nr.: 21 33 69

Abbildungen auf dem Deckblatt

Oben von links:

Knochenbau aus: Geo, September 1998; S.87

Diatomeenmasse: www.biomineralisation.de (Juni 2004)

Unten von links:

Copper-containing mineral structure as a part of bloodworm's skeleton:

www.cmmmp.ucl.ac.uk/~jhh/phd_proj.html (Juni 2004)

Große Fechterschnecke: Geo, September 2000; S.197

Brennnessel: <http://www.stud.fernuni-hagen.de/q4559630/dissertation.html> (August 2004)

Vorwort

In Vorbereitung auf diese Arbeit habe ich erfahren, in wie vielen Bereichen des Alltags die organische Kristallbildung Anwendung findet. Von der Vielfältigkeit dieser Thematik begeistert, möchte ich in der vorliegenden Arbeit auf drei Bereiche eingehen. Zum ersten ist das die Biomineralisation in terrestrischen Pflanzen, zum zweiten die Kristall- und letztlich Gesteinsbildung im Körper von Säugetieren am Beispiel des Menschen und als Drittes soll die Magnetorientierung von Brieftauben erläutert werden. Diesen dritten Teil will ich auch meinem Jugendfreund, Reiterkamerad und Brieftaubenbesitzer Michael Rieske widmen, der mich auch bei meinen Recherchen hilfreich unterstützte.

Nauen, 27.08.2004

Josepha Kempl

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
I Kristallbildung und -wachstum.....	3
Welche Eigenschaften charakterisieren einen Kristall?.....	3
Wie kommt es zur Bildung eines Kristallisationskeimes?	3
Wie wird aus dem Kristallisationskeim ein Kristall?	4
II Biomineralisation von SiO₂ in terrestrischen Pflanzen	6
III Gesteinsbildung in Säugetieren	7
Was sind eigentlich Nieren- , Blasen – und Gallensteine und wie entstehen sie?.....	7
IV Magnetorientierung von Brieftauben	10
Anhang	14
Abbildungsverzeichnis	14
Literaturverzeichnis.....	15

Einleitung

Vor ungefähr 3500 Ma entwickelten erste Prokaryonten die Fähigkeit, Minerale zu bilden. Mit dem Ende des Präkambrium und dem Einsetzen des Kambrium vor 540 Ma waren unzählige Organismen der unterschiedlichsten Stämme in der Lage, einen Großteil der heute bekannten biomineralischen Phasen zu bilden. Was bedeutet denn nun eigentlich Biomineralisation?

Biomineralisation ist ein Prozess, bei dem Organismen gelöste Ionen für ihre eigenen funktionellen Bedürfnisse in feste Minerale umwandeln. Aber der Begriff Biomineralisation bezieht sich nicht nur auf ein Mineral, welches von einem Organismus gebildet wurde, sondern auch auf die Tatsache, dass beinahe all diese mineralisierten Produkte sowohl mineralische als auch organische Komponenten mit sich führen. Wenn sich unter kontrollierten Bedingungen biomineralische Phasen gebildet haben, verfügen diese genauso über mineralische Eigenschaften wie Tracht, Habitus, Kristallinität, Spurenelementeinlagerungen etc. wie ihr anorganisch geformter Gegenpart. Der Term „Biomineral“ spiegelt also eine unwahrscheinlich große Komplexität wieder. [1]

Für die meisten Organismen ist das Kalziumion das Kation erster Wahl bei der Mineralbildung. Die kalziumführenden Biominerale überwiegen mit einer Häufigkeit von mehr als 50% unter allen

bekanntesten biologisch gebildeten Mineralen [2]. Diese Dominanz kalziumführender Minerale führte zum häufigen Gebrauch des Begriffes der Kalzifikation. (Unter Kalzifikation versteht man die Bildung Kalzium führender Phosphate, Carbonate und Oxalate sowie anderer Mineraltypen.) Von acht bekannten Polymorphen des Kalziumkarbonates sind die drei Bekanntesten wohl Kalzit, Aragonit und Vaterit. Aus der Natur kennt man hier beispielsweise Muschelschalen oder Schneckengehäuse, in denen spröde, leicht zu spaltende und relativ weiche Kristalle des Minerals Aragonit (Mohs- Härte 3) im Verbund mit weicher organischer Substanz sehr harte, extrem belastbare Gehäuse bilden (Abb.:1).

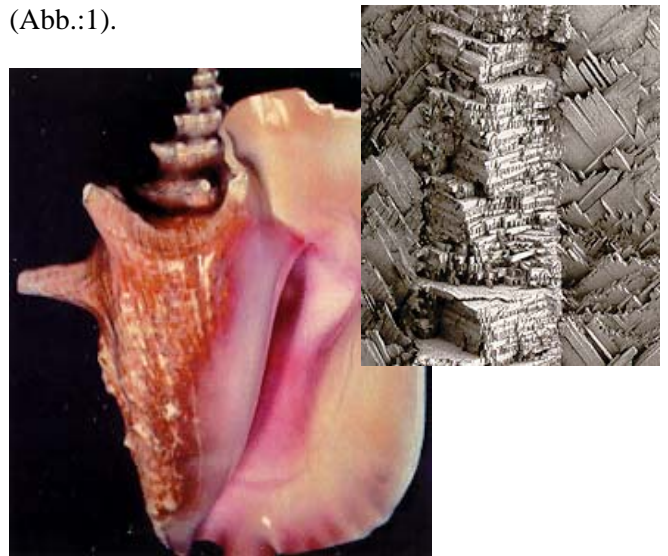


Abb.:1 Schneckengehäuse der großen Fechterschnecke, bestehend aus unzähligen übereinandergeschichteten Aragonit-Plättchen (Aufnahme oben durchs REM; ohne Maßstab).

Eierschalen sind ebenfalls verhältnismäßig stabil, wenn man bedenkt, dass ihre anorganische Komponente aus Calcit besteht. Weiterhin besitzen beispielsweise Diatomeen (Kieselalgen) eine äußere Schale aus Karbonat oder SiO_2 (Abb.:2).

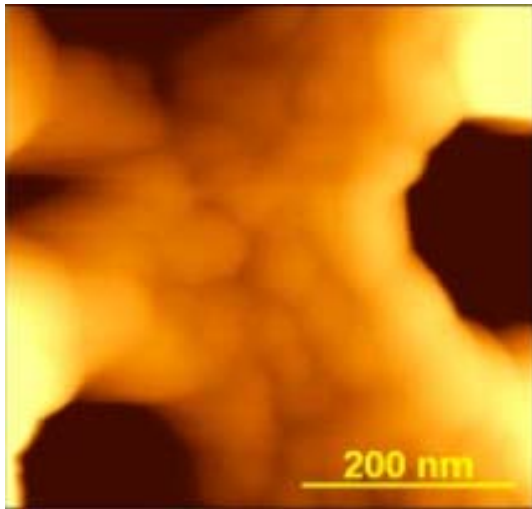


Abb.:2 Synthetisch hergestellte Schale der Kieselalgen; stark vergrößert.

Die Phosphate machen 25% der biogen gebildeten Minerale aus. Das am häufigsten gebildete Phosphormineral ist der karbonatische Hydroxylapatit (Dahlite) $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{OH})$. Natürlich present ist dieses Mineral in unseren Knochen (Abb.:3) und Zähnen. Vereinzelt wird es aber auch von Kleinstlebewesen wie Muscheln oder Schnecken gebildet.



Abb.:3 Das Menschliche Skelett besteht aus karbonatischem Hydroxylapatit.

Weiterhin können Sulfate, Sulfide, Arsenate, hydratisierte Silikate, Chloride, Fluoride, Oxide, Hydroxide und Kristalle, bestehend aus organischen Substanzen, von Organismen gebildet werden. Die

eisenhaltigen Biominerale werden nicht als eigenständige Gruppe angesehen, denn sie treten bei der Bildung von Sulfiden, Oxiden und Hydroxiden in Erscheinung. Sie sind jedoch von bedeutender Wichtigkeit, da sie an der Bildung von Biomineralen beteiligt sind. Die Bildung von Magnetit in Organismen ist eine sehr interessante und viel diskutierte Thematik.

Erwähnenswert ist, dass jede der genannten Mineralklassen eine oder mehrere wässrige Phasen beinhaltet. Diese hydratisierten Formen sind mit ca. 60% an der Bildung biogener Minerale beteiligt. Alle Silikate treten in hydratisierter Form in der Natur auf. Darüber hinaus weiß man heute, dass viele karbonatische Minerale als erstes die hydratisierte Phase bilden. Dies liegt darin begründet, dass wässrige Phasen bei der Kristallbildung und beim Kristallwachstum niedrigere Energiebarrieren überwinden, als ihre dehydratisierten Phasen. Dies machen sich die Organismen zu Nutze, in dem sie die niedrigere Energiephase bei ihrer Kristallbildung bevorzugen. (OSWALD-Stufenregel; Abb.:4) [1] [5].

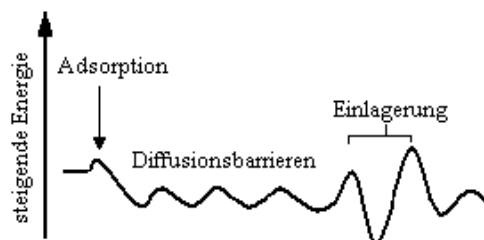


Abb.:4 Materie wird von einem Status hoher freier Energie in einen Status niedrigerer freier Energie (Kristallgitter) umgeformt.

I Kristallbildung und -wachstum

Wiederholend und allgemein soll im Folgenden erläutert werden, was ein Kristall auszeichnet, wodurch ein Kristallisationskeim entsteht und wie es zu einem fertigen Kristall kommt.

Welche Eigenschaften charakterisieren einen Kristall?

Ein Kristall ist ein, durch eine strenge Ordnung ausgezeichneter und durch eine dreidimensional, periodisch-unendliche Anordnung der kleinsten Gitterbausteine (Ionen, Atome, Moleküle), charakterisierter Zustand. Die Gitterbausteine nehmen feste Positionen ein. Die Lage eines beliebigen, im Gesamtgitterverband befindlichen Teilchens ist durch die seiner Nachbarpartikel eindeutig bestimmt.[3]

Wie kommt es zur Bildung eines Kristallisationskeimes?

Die Kristallbildung muss in zwei Phasen unterschieden werden. Die erste Phase ist die so genannte Nukleation, die Keimbildung aus submikroskopischer Dimension. Die zweite Phase ist das Kristallwachstum, also das Weiterwachsen des Keimes zu einem makroskopischem Kristall mit einer, für den Kristall charakteristischen Flächenbegrenzung.[4]

Beide Prozesse unterscheiden sich in ihrem Energieverbrauch und ihren Mechanismen, die von zahlreichen Variablen abhängen. Der Vorgang der Kristallbildung ist stark druck- und temperaturabhängig. Darüber hinaus spielt das chemische Potential einer

Stoffmenge, die man sich als Untersuchungsobjekt wählt, und ebenso ihr pH-Wert eine bedeutende Rolle. Auch der Grad der Sättigung bzw. Übersättigung einer Substanz in einer Lösung muss berücksichtigt werden (Abb.:5 und 7).

Der Prozess der Keimbildung ist streng von dem des eigentlichen Kristallwachstums zu trennen. Folglich muss ein Keim erst eine kritische Größe erreicht haben, bevor das Wachstum eines stabilen Kristalls fortgesetzt werden kann. Abbildung 5 stellt schematisch die Bildung eines Kristallisationskeimes dar. Der Stoff A liegt hier in der Dampfphase vor. Bei hinreichender Abkühlung wird der Punkt B erreicht. Kristalline Phase und Dampfphase liegen im Gleichgewicht. Mit weiterer Abkühlung und Überschreitung von B beim Druck von p_1 verschiebt sich das Gleichgewicht in die Dampfphase.

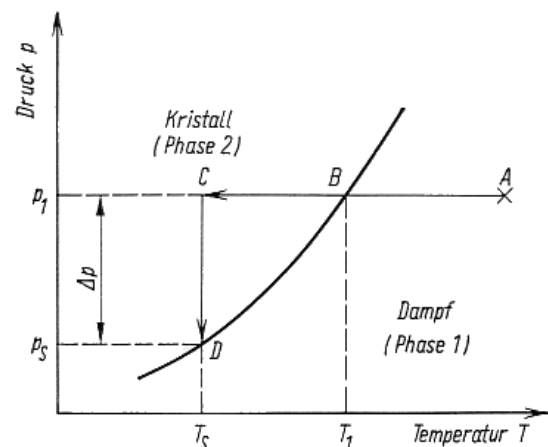


Abb.:5 Schematische Darstellung der Bildung eines Kristallisationskeimes im P-T-Diagramm.

Im Punkt C ist so viel Dampf enthalten, dass selbiger sich bei der Temperatur T_s beginnt, in die flüssige oder die feste Phase

des Stoffes umzuwandeln. (Jeder kennt dieses Phänomen bei der Kondensation von Wasserdampf in einem geschlossenen Behälter. Man spricht dann von Nebel- od. Niederschlagsbildung).

Der Weg bis zu D geht mit einer Druckverringerung bis zu p_s einher. Hier liegt die Phase höherer Energie im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Dampfphase. An diese Stelle ist die Bildung eines Kristallisationskeimes begünstigt. Je nach Bedingungen der Umgebung und nach Ausgangsstoff ist die Kristallbildung aus der Dampfphase oder aus der flüssigen Phase möglich. Sinngemäße Übertragung ist auf alle Phasenübergänge stoffunabhängig anwendbar.

Wie wird aus dem Kristallisationskeim ein Kristall?

Die in einer Lösung angereicherten Elemente aus der Umgebung des neuen Kristallkeimes müssen sich nun auf einen Punkt, nämlich die neu gebildete Kristalloberfläche konzentrieren. Durch zahlreiche chemische Prozesse, wie Diffusion oder die Dissoziation von komplexen Ionen an der Keimoberfläche setzt das Wachstum des Kristalls schließlich ein. Man unterscheidet mehrere Wachstumsmechanismen, wobei kurz die zwei bedeutendsten, der „Birth and Spread“ Mechanismus und das Spiralwachstum erläutern sollen. Die Abbildungen 6a und 6b zeigen modellhaft die atomaren Prozesse, die auf einer Kristalloberfläche während des Wachstums ablaufen. Die Kristalloberfläche besteht aus Ebenen

(Terrassen) die durch Stufen, von bereits darüber gebildeten Inseln neuer Kristalloberflächen voneinander getrennt sind. Die Stufen selbst sind wie die Terrassen durch die sogenannten Kinks oder Fehlstellen unvollständig. Je nach verfügbarer Energie beim Kristallwachstum werden diese Kinks von Molekülen besetzt oder bleiben als Fehlstellen zurück bzw. bieten sie später Fremdeinlagerungen Platz.

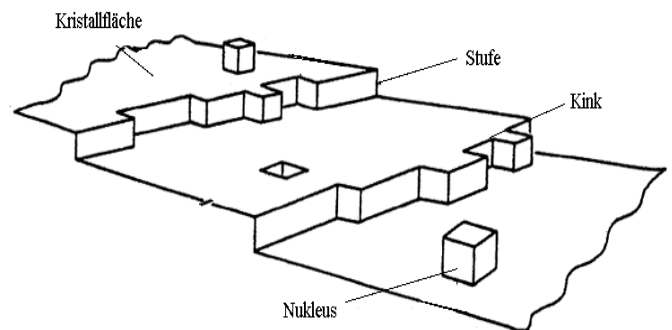


Abb.:6a „Birth and Spread“; Wachstum einer Kristalloberfläche

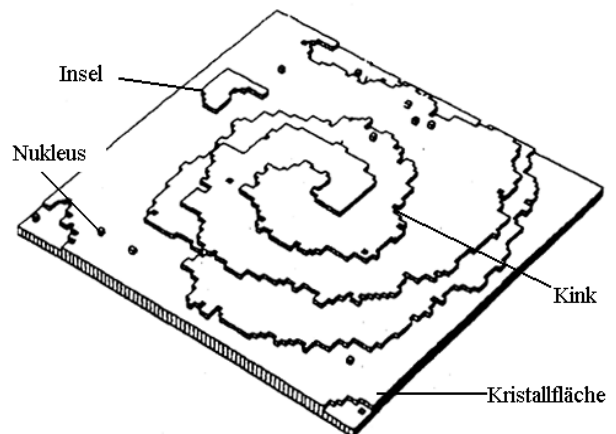


Abb.:6b Spiralwachstum einer Kristalloberfläche

Die Anlagerungen neuer Moleküle aus einer Lösung geschieht immer an der Stelle, an der der geringste Energieaufwand nötig wird (Abb.:4). Solche Stellen sind eben die

Kinks oder die Stufen zwischen den Kristallflächen. Der Spiralwachstum ist der energetisch begünstigtere von beiden Mechanismen, denn die Spirale hat kein Ende. Sie wird neuen Molekülen immer wieder Fläche zum Anlagern bieten.

Abbildung 7 soll noch einmal zusammenfassend und stark vereinfacht die Wechselwirkungen während der Kristallbildung zwischen den herrschenden Bedingungen der Umgebung und der sich umwandelnden Phase darstellen. Schematisch wird hier deutlich, wie viele unzählige „Ebenen des Ausgleichs“ [1] (Ebenen für den Ausgleich der wechselwirkenden Energien) existieren und miteinander coexistieren. Sie beeinflussen die physikalischen und biochemischen Prozesse bei der Kristallbildung erheblich.

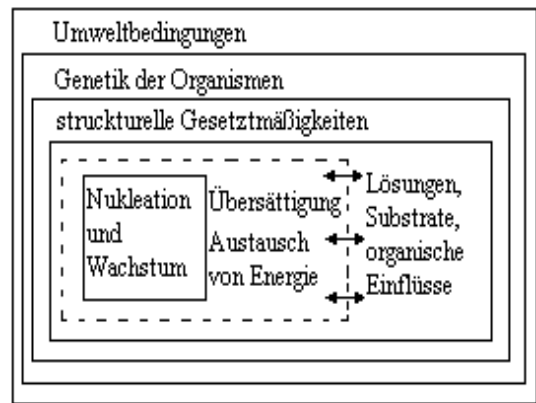


Abb.:7 Wechselwirkungen zwischen den Ausgleichsebenen bei der Biomineralisation.

Deutlich wird besonders, dass die Biomineralisation von Konzentrationen vorhandener Substanzen, der An- oder Abwesenheit von Lösungen, vorhandener Energien und organischen Einflüssen abhängt und mit all ihren Gesetzmäßigkeiten und Besonderheiten den Gesetzen der Natur gehorchen muss.

II Biomineralisation von SiO_2 in terrestrischen Pflanzen

Siliziumdioxid 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 [6].

SiO_2 ist das häufigste Oxid in der Erdkruste. Über die Lösung in Flüssen, Seen und Ozeanen ist das Silizium in Form von Kieselsäure in Bewegung und wird von marinen Organismen, wie zum Beispiel den Diatomeen (Abb.:2) für die Konstruktion ihrer Außenschalen (Exoskelett) verwendet. Die Ausscheidungsformen von festem $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ stellen in Pflanzen durch den Verbund mit der organischen Matrix hochkomplexe Strukturen (Biokomposite) dar. Sie umfassen die Auskleidung von beispielsweise Zellwänden oder die Bildung von blockförmigen bzw. morgensternförmigen Partikeln, was die außerordentliche Vielfalt der Biomineralisation von SiO_2 in Pflanzen aufzeigt. Die Bildung von SiO_2 -Biokompositen ist pflanzenspezifisch.

Terrestrische Pflanzen, die bis zu 600 Liter Wasser benötigen um ein Kilogramm Trockenmasse zu produzieren, nehmen das gelöste Silizium aus der Bodenlösung auf. In zahlreichen Pflanzen wird dieses in Form von Festkörpern mineralisiert. Hierzu zählen neben vielen anderen die Tropenhölzer (man kennt „verkieseltes Holz“) und die heimische Brennnessel (Abb.:8).



Abb.:8 Die in Mitteleuropa heimische Brennnessel mineralisiert Kieselsäure aus terrestrischen Gewässern und bildet daraus ihre Nadelchen.

Durch ihren hohen Wasserdurchsatz und ihr schnelles Wachstum kann die Brennnessel besonders schnell kieselsäurehaltige Wässer aufnehmen. Hier wurde in intensiven Untersuchungen kristallines SiO_2 (Quarz) in den Brennhaaren identifiziert [9]. Die eigentliche Ursache für die brennenden Schmerzen bei der Berührung der Pflanze ist jedoch die Ameisensäure. In den frühen Phasen der Ausscheidung von SiO_2 in der Brennnessel ist ein hoher Anteil an Kalium vorhanden, welches einen hohen Einfluss auf die Bildung von schichtstrukturiertem SiO_2 hat. Weitere Analysen haben überraschende Inhaltsstoffe an den Tag gebracht: so z.B. Chlorophyll, Histamin, Gallus-, Gerb- und Ameisensäure, Glukokinin, Acetylcholin, Vitamin A und E, sowie diverse Mineralsalze, Eisen Magnesium, Silizium, Natrium, Kalzium und Phosphor [7].

Die mechanischen Prozesse der Biomineralisation von SiO_2 auf molekularer Ebene sind bisher unverstanden.

III Gesteinsbildung in Säugetieren

Ausgesprochen lästige Produkte einer Biomineralisation sind die verschiedensten Gallen-, Nieren- oder Blasensteine, die sich sowohl im menschlichen Organismus als auch in den Organismen der unterschiedlichsten Säugetiere bilden.[6]

„Der bekannteste organische Stein ist der „Bezoar“. Er wird vorwiegend von Hirschen produziert, hat einen angenehmen Duft und wurde früher nicht nur als Schmuckstein getragen, sondern auch als Hilfe gegen Vergiftungen jeder Art benutzt. Papst Innozenz XI, einer der würdigsten Päpste der Geschichte, war ein begeisterter Sammler von Bezoaren. Er glaubte an ihre Hilfe gegen Gift, Seuchen und die Pest.“ [...] *„Der wahrscheinlich interessanteste Stein organischer Herkunft wird als solcher gar nicht erkannt. Mit einem spezifischen Gewicht von nur etwa 0,8 ist er so leicht und weich, dass er auf Wasser schwimmt. Man spricht von ihm auch nicht mehr als Stein, sondern nennt ihn "Konkrement", welches als "Ambregis" bekannt ist. Es handelt sich dabei um jene Steinform, die der Pottwal ausspuckt und die als sündhaft teure Trägersubstanz bei der Parfumherstellung Verwendung findet“.* [14]

Gesteins- oder Steinbildungen sind weder dem Menschen noch dem Tier angenehm. Sie gehen immer mit starken Schmerzen und großen körperlichen Beschwerden einher. Bei den Tieren ist die Neigung zur Steinbildung noch viel größer als beim Menschen. Bemerkenswert ist aber, dass

Tiere die Steine mitunter relativ leicht loswerden.

Was sind eigentlich Nieren-, Blasen – und Gallensteine und wie entstehen sie?

Etwa zwei bis drei Prozent der Bevölkerung leiden an Nierensteinen, wobei Männer doppelt so häufig betroffen sind wie Frauen. Die Ursache ihrer Entstehung ist weitgehend ungeklärt. Vermutlich handelt es sich um eine genetisch veränderte Konzentration und Zusammensetzung des Urins durch geringe Flüssigkeitszufuhr. Hemmstoffmangel*, Stoffwechsel- und Leberfunktionsstörungen, sowie ein Mangel an Vitamin A und eine fett- und eiweißhaltige Ernährung begünstigen die Steinbildung.

Nierensteine (Abb.:9) sind Verbindungen, die aus Bestandteilen des Urins bestehen. Diese Konkreme bilden sich in den Kanälchen der Niere, im Nierenbecken und den ableitenden Harnwegen.

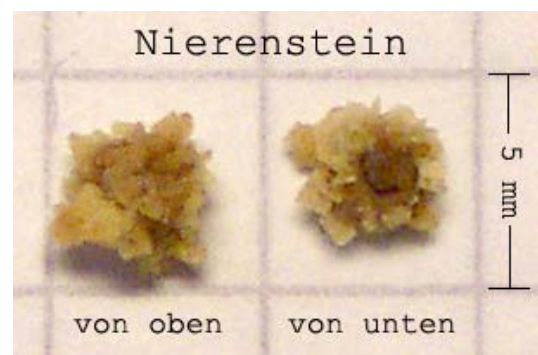


Abb.:9 Nierenstein mit einer Größe von 5mm

*Hemmstoffe: Magnesium oder Ziträt verhindern in den Harnwegen und der Blase die Ausfällung von Konkrementen.

Die Entwicklung solcher Steine ist auf die Ausfällung von Kristallen aus dem Urin durch Hemmstoffmangel und auf die folglich damit einhergehende Übersättigung des Urins, an beispielsweise Kalzium oder anderen Mineralsalzen zurückzuführen. Es bilden sich Kristallisationskeime im Urin, die als Nierensand oder –grieß bezeichnet werden. Ausgefällte Harnbestandteile lagern sich an und es kommt zur Steinbildung.

Die Größe der Steine reicht von Stecknadelkopfgröße bis zu Steinen, die das ganze Nierenbecken ausfüllen und unter Umständen Gewichte von bis zu 1 kg erreichen können. Die Zusammensetzung der Nierenstein besteht zu einem Viertel aus organischen und zu drei Vierteln aus anorganischen Bestandteilen. Je nach Zusammensetzung unterscheidet man Kalzium- Oxalat- Steine, Uratsteine, Phosphatsteine oder Zystinsteine [17].

Die Kalzium- Oxalat- Steine machen ca. 60% aller Nierenleiden aus. Sie bestehen aus Kali- Salzen und Oxalsäure (z.B. Whewellit $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ oder Weddelith $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [18]) und sind meist hart, grau-schwarz, und eckig. Sie können Folge eines Vitamin B6- oder Magnesiummangels sein. Uratsteine treten mit einer Häufigkeit von 20% auf. Sie bestehen aus Harnsäure und harnsauren Salzen und entstehen in stark saurem Harn durch Ausfällung von Harnsäurekristallen ($\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$ in monokliner oder pseudo-orthorhombischer Modifikation) als Folgeerscheinung von Gicht. Die Uratsteine sind meist hart, glatt und gelb-braun und können durch Alkalisierung aufgelöst

werden. Die Phosphat- oder Magnesiumphosphatsteine sind weiß bis bräunlich, glatt und weich. Als Beispiel sei hier der Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) und das Magnesiumhydrogenphosphat -trihydrat (Newberyit $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) genannt. Schließlich werden noch die Zystinsteine aus der Aminosäure Zystin, bestehend aus Eiweißen, Arginin und Lysin, aufgebaut. Quantitativ machen sie den geringsten Anteil der Nierenleiden aus.

So lange sich Nierensteine in den Nieren befinden ohne harnableitende Wege zu verschließen, verursachen sie keine Beschwerden. Sehr schmerzhaft wird es, wenn sie in den Harnleiter gelangen. Dass seelische Erregungszustände für das Auftreten oder Lösen von Steinen zumindest mitverantwortlich sein können, belegt der Ausdruck „das geht mir an die Nieren“.

Die Gallenblase ist ein birnenförmiges Organ, das unterhalb der Leber liegt und den von ihr produzierten gelb-grünen Verdauungssaft, die Galle speichert.

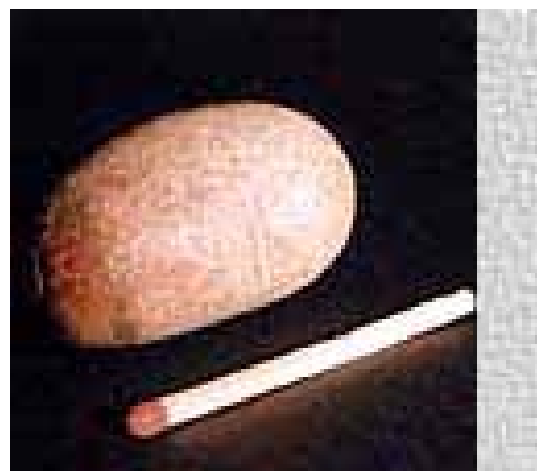


Abb.:10 Gallenstein

Eine Kristallansammlung in der Gallenblase tritt häufiger bei Frauen als bei Männern auf. Gallensteine (Abb.:10) bestehen aus Cholesterin und Kalziumsalzen.

Infolge von Übersättigung kommt es auch hier zur Ausfällung der Gallensalze, von Mineralen, dem Lecithin, einem Lipid und dem Cholesterin [19]. Im Schema zur Löslichkeit von Gallensalzen, Cholesterin, und Lecithin (Abb.:11) nach Admirand und Small stellt die Zone A den Bereich der vollständigen Lösung der drei Komponenten dar. In Zone B treten zusätzlich Kristalle auf [18].

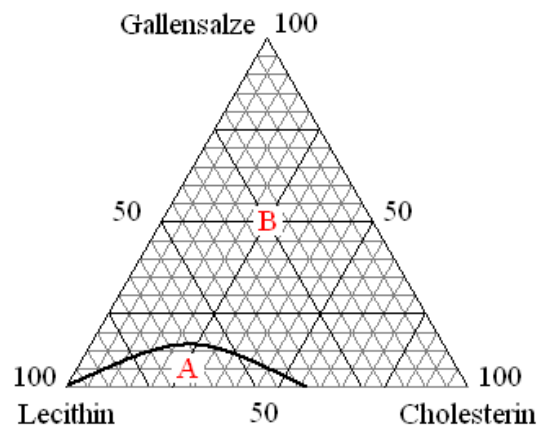


Abb.: 11 Löslichkeit von Gallensalzen, Cholesterin und Lecithin bei einem Wassergehalt von 90%.

Blasensteine sind ebenfalls ein Übersättigungsprodukt des Urins. Kalisalze, Zystin, Phosphatsteine und Harnsäure können hier ausfallen. Diese Steine können eine Größe von bis zu 3 cm erreichen.

IV Magnetorientierung von Brieftauben

Die Fähigkeit von Brieftauben auch aus unbekanntem Gebieten den Heimatschlag zu finden hat schon immer die Menschen fasziniert. Aus dem enormen Orientierungsvermögen dieser Tiere hat sich der Brieftaubensport entwickelt, bei dem jede Woche Tausende von Tauben aufgelassen werden um die schnellsten Tiere zu ermitteln. Bislang ist jedoch nicht genau geklärt, wie es die Tiere schaffen aus einem unbekanntem Gebiet wieder den Weg in ihren Heimatschlag zu finden [10].

Schon in den 70iger Jahren machten amerikanische Wissenschaftler Verhaltenstests mit Brieftauben. Dabei wurden die Tiere an einen Auflassort transportiert von dem die Richtung und die Entfernung zum Heimschlag bekannt war. Dann wurden die Tauben, anders als bei Taubenrennen, einzeln aufgelassen und die Richtung protokolliert, in der die Tiere verschwanden. Die Daten der Verschwinderichtung, der Verschwindezeit und der Ankunftszeit am Heimschlag wurde ermittelt und daraus ein Maß für die Orientierungsfähigkeit beschrieben. Durch verschiedene gezielte Manipulationen der Tauben wollte man feststellen, inwieweit die Orientierungsfähigkeit der Tiere dadurch beeinflusst werden konnte. Durch diese Untersuchungen konnten im Laufe der Jahre verschieden Faktoren beschrieben werden, die wahrscheinlich von Tauben zur Orientierung genutzt werden. So wurden Geruch, Infraschall und das Erdmagnetfeld

(siehe: „Das Magnetfeld der Erde“ Kasten S.12) als Orientierungsfaktoren diskutiert. Neben dem Sonnenstand, den Brieftauben als Kompasssystem nutzen, wurden für die anderen sogenannten Kartenfaktoren immer wieder unterschiedliche Theorien aufgestellt. Besonders das Erdmagnetfeld als Orientierungsfaktor wurde von der Wissenschaft sehr kontrovers diskutiert, da bislang noch kein Rezeptorsystem beschrieben werden konnte, das den Tieren die Wahrnehmung von magnetischen Parametern ermöglichen könnte.

Untersuchungen, die von Geophysikern der Universität München durchgeführt wurden, beschäftigen sich mit dem möglichen Aufbau eines Rezeptorsystems bei Brieftauben, die den Tieren das „Messen“ des Erdmagnetfeldes ermöglichen. Basis der Überlegungen war, dass in vielen verschiedenen Organismen Magnetit nachgewiesen werden konnte, das auf Magnetfelder in Erdfeldstärke reagiert und damit die Grundlage für eine Magnetorientierung auch bei Brieftauben bilden könnte. Man versuchte herauszufinden, ob und wo Magnetit im Gewebe von Brieftauben vorhanden ist und ob es mit Nerven in Verbindung steht. Einen Hinweis auf die Lokalisation des Materials im Gewebe lieferten elektrophysiologische Untersuchungen an einem bestimmten Gehirnnerv der Vögel. Am Nervus ophthalmicus (Abb.:12) von Vögeln wurden elektrophysiologische Ableitungen durchgeführt und es zeigte sich, dass die an einzelnen Nervenfasern abgeleiteten

elektrische Potentiale sich unter dem Einfluss von einem äußeren Magnetfeld veränderten.



Abb.:12 Verlauf des Nervus ophthalmicus im Oberschnabel von Tauben.

Daraus wurde geschlossen, dass dieser Nerv die Information über magnetische Parameter an das Gehirn weiterleitet und damit direkt mit einem möglichen Magnetrezeptor in Verbindung stehen muss.

Bedauerlicherweise existiert keine histologische Nachweismethode für Magnetit.

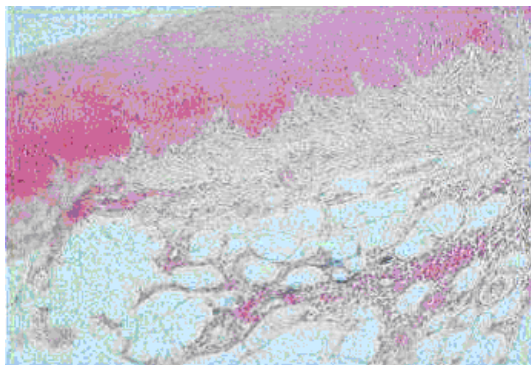


Abb.:13) Histologischer Schnitt mit Eisenanreicherungen (Berlin-Blau Reaktion) in bestimmten Schichten der Oberschnabelhaut von Tauben (100fach vergrößert).

Da es sich aber um dreiwertiges Eisen handelt, kann über den Nachweis von Fe_2^{+3} (Berlin-Blau-Reaktion) näherungsweise festgestellt werden, ob sich Magnetit im

Gewebe befindet (Abb.:13). In ganz bestimmten Schichten der Oberschnabelhaut konnten so geringe Mengen von dreiwertigem Eisen nachgewiesen werden. Mit Hilfe der Feinbereichsbeugung, die am Elektronenmikroskop durchgeführt wurde, konnte man die vorher festgestellten Eisenanreicherungen als Magnetit charakterisieren. Hierbei sind die sehr kleinen Magnetitkristalle (maximal 5 nm) zu Clustern von 1 bis 2 nm zusammengeslossen. Mehrerer solcher Cluster sind kettenförmig in einer Zelle angeordnet. Diese Zellen wiederum wurden mit geeigneten Verfahren als Nervengewebe charakterisiert.

Damit war der morphologische Nachweis für erbracht: Magnetit befindet sich in den Nervenzellen in bestimmten Schichten der Oberschnabelhaut von Tauben.

Wie ermöglichen diese Strukturen im Oberschnabelhautgewebe dem Tier die Aufnahme von magnetischen Reizen? Theoretische Berechnungen sowie Modellversuche konnten zeigen, dass ein Magnetitcluster seine Form in Abhängigkeit vom umgebenden Magnetfeld verändert. Dabei deformiert sich der einzelne Magnetitcluster entsprechend der Stärke und der Achse des Magnetfeldes. Diese Deformation kann an der, den Cluster umgebenden Membran, eine Potentialveränderung induzieren, die dann am fortführenden Nerven eine Erregung auslöst und so die Information zum Gehirn weiterleitet.

In einer Zelle sind immer mehrere Cluster vorhanden. Das ist der Grund dafür, dass die, durch ein Magnetfeld ausgelöste Membrandeformation verstärkt wird. Mit solch einem Rezeptorsystem ist es Brieftauben möglich, kleinste

Veränderungen des umgebenden Magnetfeldes zu „messen“.

Das Magnetfeld der Erde

Nach der Dynamo-Theorie erzeugen Konvektionsströme des flüssigen Erdkerns das primäre Magnetfeld, das durch die Erdrotation (Coriolis-Kraft) in der Rotationsachse ausgerichtet wird. Dadurch entsteht ein weitgehend statisches Dipolfeld, dessen Pole sich in der Nähe der beiden geographischen Pole befinden. Die magnetischen Feldlinien treten am magnetischen Nordpol aufwärts gerichtet aus der Erdoberfläche und treten am magnetischen Südpol, in der Nähe des geographischen Nordpols wieder ein (Abb.:14). Auf der südlichen Hemisphäre verlaufen die magnetischen Feldlinien aufwärts, auf der Nordhalbkugel abwärts gerichtet. Am magnetischen Äquator verlaufen sie parallel zur Erdoberfläche.

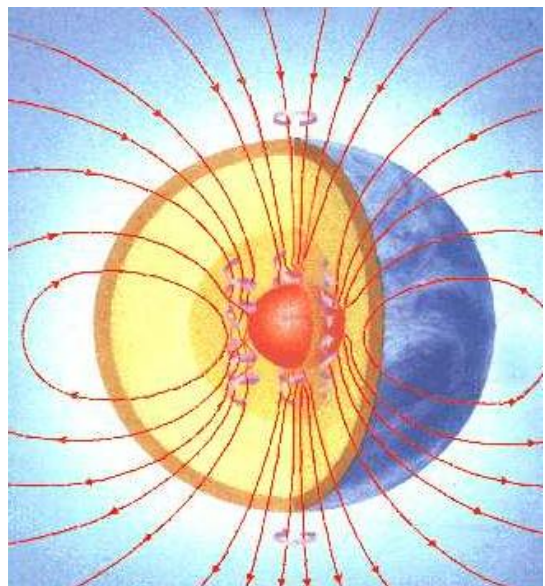


Abb.:14 Schematische Darstellung der Magnetfeldlinien der Erde

Die Neigung der magnetischen Feldlinien bezogen auf die Horizontalebene wird als Inklination beschrieben. Die Inklination beträgt am Nordpol $+90^\circ$, am Äquator 0° und am Südpol -90° . Die Stärke des Erdmagnetfeldes ergibt sich aus dem vektoriellen Betrag der Feldlinien der Totalintensität.

Die einzelnen Magnetfeldparameter verlaufen nicht in einer absoluten Nord-Süd-Ausrichtung. Aufgrund der im Erdinneren sich bewegenden flüssigen Konvektionsströme verlaufen die Isodynamen (Linien gleicher Totalintensität) in Mitteleuropa von Nordwest nach Südost. Zusätzlich wird durch teilweise in die Erdkruste eingelagerte magnetische Materialien die ursprüngliche Gleichmäßigkeit des Dipolfeldes mehr oder weniger stark durch magnetische Anomalien moduliert.

Die Intensität des Magnetfeldes unterliegt auch zeitlichen Schwankungen (Säkularvariationen bzw. kurzfristige Schwankungen durch die Sonnenaktivität), die das Orientierungsverhalten der Brieftauben beeinflussen können [11] [12].

Heute kann man nach intensiven Studien sagen, dass Brieftauben ein Rezeptorsystem besitzen welches ihnen ermöglicht, sich mit Hilfe des Erdmagnetfeldes zu orientieren. Voraussetzung dafür ist, dass die Tiere in ihrer Jugendphase gelernt haben wie sich, ausgehend vom Heimschlag, die Intensität des Magnetfeldes in Abhängigkeit von der geographischen Richtung verändert. Nach der Trainingsphase sind die Tiere in der Lage, durch Extrapolieren der erlernten Werte, auch aus unbekannt Gebieten wieder den Heimschlag zu erreichen.

Beachtliche Leistungen wurden schon auf zahlreichen Taubenrennen erreicht. Besonders schnelle Brieftauben können Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h erreichen und diese auch durchfliegen. Auf dem „Wettflug Nr.12 vom 31.07.2004; Gent

639 km“, veranstaltet durch den VDB (Verband Deutscher Briefzüchter) e.V. des Regionalverbandes Berlin Brandenburg legte die schnellste Taube auf einer unbekannt Strecke ihren Weg in acht Stunden und 17 Minuten zurück.

Das Erdmagnetfeld ist wahrscheinlich der wichtigste Kartenfaktor beim Heimfindeverhalten von Brieftauben. Bei zukünftigen wissenschaftlichen Untersuchungen müssen die räumlichen und zeitlichen Variationen der Magnetfeldintensität, sowie die Funktionsweise der gefunden Rezeptorstruktur berücksichtigt werden um zumindest teilweise verstehen zu können, wie Brieftauben zu solchen Orientierungsleistungen fähig sind.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

- Abb.:1** Schneckengehäuse der großen Fechterschnecke, bestehend aus unzähligen übereinandergeschichteten Aragonit- Plättchen (Aufnahme oben links durchs REM; ohne Maßstab). [21]
- Abb.:2** Synthetisch hergestellte Schale der Kieselalgen; stark vergrößert. [14]
- Abb.:3** Das Menschliche Skelett besteht aus karbonatischem Hydroxylapatit. [21]
- Abb.:4** Materie wird von einem Status hoher freier Energie in einen Status niedrigerer freier Energie (Kristallgitter) umgeformt. [1] (S.59; geändert: Kempl, J.)
- Abb.:5** Schematische Darstellung der Bildung eines Kristallisationskeimes im P-T-Diagramm. [3]
- Abb.:6a** „Birth and Spread“; Wachstum einer Kristallfläche [4] (S.60; ; geändert: Kempl, J.)
- Abb.:6b** Spiralwachstum einer Kristallfläche [4] (S.61; ; geändert: Kempl, J.)
- Abb.:7** Wechselwirkungen zwischen den Ausgleichseben bei der Biomineralisation. (S.60; geändert: Kempl, J.)
- Abb.:8** Die in Mitteleuropa heimische Brennessel mineralisiert Kieselsäure aus terrestrischen Gewässern und bildet daraus ihre Brennhaare. [7]
- Abb.:9** Nierenstein mit einer Größe von 5mm [Bildersuche Google; Quelle unbekannt]
- Abb.:10** Gallenstein [Bildersuche Google; Quelle unbekannt]
- Abb.: 11** Löslichkeit von Gallensalzen, Cholesterin und Lecithin bei einem Wassergehalt von 90%. [17] (geändert: Kempl, J.)
- Abb.:12** Verlauf des Nervus ophthalmicus im Oberschnabel von Tauben [11]
- Abb.:13** Histologischer Schnitt mit Eisen-anreicherungen (Berlin-Blau Reaktion) in bestimmten Schichten der Oberschnabelhaut von Tauben (100fach vergrößert). [11]
- Abb.:14** Schematische Darstellung der Magnetfeldlinien der Erde [11]

Literaturverzeichnis

- [1] „Biom mineralization“; Reviews in Mineralogy and Geochemistry; Vol.54; Editors: Dove, P.M.; De Yoreo, J.J.; Weiner, S.; Mineralogical Society of America; Washington 2003
- [2] “On Biom mineralization“; Lowenstam, H.A.; Weiner, S.; Oxford University Press; New York; 1989
- [3] „Physikalisch chemische Kristallographie“; Meyer, K.; 5. Auflage; VEB Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1977
- [4] “Phosphates”; Reviews in Mineralogy and Geochemistry; Vol. 48; Editors: Kohn, M.J.; Rakovan, J.; Mineralogical Society of America; Washington 2002
- [5] “Biom mineralization: Principles and Concepts in Bioorganic Materials Chemistry”; Mann, S., Oxford University Press; New York 2001
- [6] BIO-KRISTALLE; KRISTALL UND MENSCH; Eine Informationsbroschüre für Lehrer und Schüler zur Verwendung im projektorientierten Unterricht, sowie zum Selbststudium.; Depmeier, Prof. Dr. W.; Universität Kiel, Institut für Geowissenschaften, Mineralogie und Kristallographie; Kiel 2002
- [7] <http://www.heilpflanze.ch/Brennessel.htm> ; August 2004
- [8] “Silica”; Reviews in Mineralogy and Geochemistry; Vol. 29; Editors: Heaney, P.J.; Prewitt, C.T.; Gibbs, G.V.; Mineralogical Society of America; Washington 1994
- [9] „Biom mineralisation von SiO₂ in terrestrischen Pflanzen“; Felsche, Prof. Dr.; Laboratorium für Festkörperchemie; Universität Konstanz; Konstanz 2004
- [10] „Die Magnetorientierung von Brieftauben“; Holtkamp-Rötzler, Dr. E.; Zoologisches Institut Goethe- Universität Frankfurt/Main
- [11] <http://www.internet-taubenschlag.de/magazin/magnetorientierung/welcome.htm> ; August 2004
- [12] „Gerthsen Physik“; Meschede, D.; 21. Auflage; Springer- Verlag; Berlin Heidelberg New York 2002
- [13] „Wettflug Nr.12 vom 31.07.2004; Gent 639 km“; Verband Deutscher Brieftaubenzüchter e.V.; Regionalverband: 300 - Berlin- Brandenburg
- [14] <http://www.biomineralisation.de> ; Juli 2004
- [15] <http://www.netdokter.at/krankheiten/fakta/nierensteine.htm> ; August 2004
- [16] „Blasen- und Nierenleiden; Vorsorgen, Symptome, Ursachen, Heilverfahren“; Leiroid, G.; 2.Auflage; Oesch/ Jopp- Verlag; Zürich 2004

- [17] „Innere Medizin in Praxis und Klinik“; Hornborstel, H.; Thieme- Verlag, Stuttgart
- [18] „Handbuch Gesundheit“ MSD Manual; Berkow, R.M.D. et al.; 1. Auflage; Wilhelm-Goldmann- Verlag; München 2004
- [19] www.cmp.ucl.ac.uk/~jhh/phd_proj.html ; Juli 2004
- [20] <http://www.stud.fernuni-hagen.de/q4559630/dissertation.html> ; August 2004
- [21] Geo, September 1998; S.87