

Perlmutter - Vorbild für nachhaltig zukunftsfähige Werkstoffe

1. Ausgangspunkt

Perlmuttergehäuse werden von Muscheln und Schnecken als Biomineral zum Zwecke des Fraßschutzes aufgebaut. Aus dem überreichen Kalkangebot der Meere kristallisieren sie diese biogene Keramik mit einem hochgeordneten nanoskaligen Gefüge, wie es technisch bisher nicht realisierbar war. Zäher als Industriekeramik, dauerhaft und schön: mit diesen Eigenschaftskombinationen eignen sich perlmuttartige Gefüge für zahlreiche Einsatzfälle, von denen bisher auf der Basis ‚natürlichen‘ Perlmutter lediglich die Verwendung im Schmuck- und Dekorationsbereich realisiert wurde.

2. Entwicklungsziel

Das Potential neuer keramischer Werkstoffe, deren Strukturbildung, Eigenschaften und Ökobilanz dem Vorbild der Natur folgen, soll offengelegt werden und zu neuen Produkten führen. Die Reaktionen, einzusetzenden Stoffe und Zielgefüge werden in der Lernphase durch das natürliche Vorbild Perlmutter, in der Realisierungsphase zunehmend durch komplementäre Methoden und die Erfordernisse neuer technischer Keramiken geprägt.

3. Entwicklungsschritte und Projektergebnisse

3.1 Molekularbiologische Grundlagen

Das Projekt nutzt die molekularbiologischen Fortschritte bei der Aufklärung der Perlmutterbildung, insbesondere die Erkenntnisse über die biologische Steuerung der Kristallisation durch Biopolymere als Template. Drei Wege zur technischen Synthese des Perlmutter wurden verfolgt. Aus natürlichem Perlmutter isolierte Biopolymere (Chitin und Proteine wie z. B. Perlucin) können zur In-vitro-Synthese eingesetzt werden. Dazu wird Perlmutter zu einem Pulver verarbeitet, in Lösung gebracht und kann dann, sozusagen als "flüssiges Perlmutter" auf Oberflächen aufgebracht und ausgehärtet werden (Abb.1).

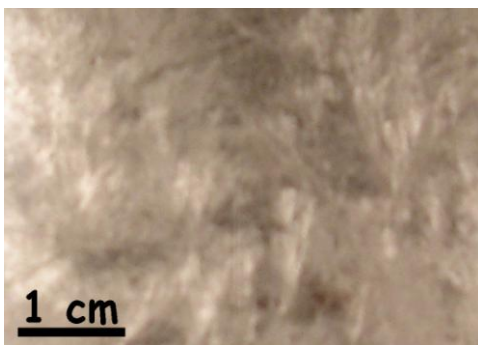


Abb.1 Beschichtung einer Glasoberfläche mit einer 1 mm dicken, glänzenden Schicht aus einem Verbund aus Aragonit und Chitin („flüssiges Perlmutter“).

Plättchen aus Calciumcarbonat lassen sich in eine Chitinmatrix kristallisieren, wie eine Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigt (Abb.2). Die Biopolymere können jedoch auch gentechnisch erzeugt (rekombinante Perlmutterproteine) oder aus anderen biogenen Quellen bezogen werden (wie z. B. Chitin aus Krabbenschalen). Schließlich können synthetische Polymere auf ihre Wirksamkeit bei der Perlmutterkristallisation getestet werden. Nach und nach können alle nativen Biopolymere durch synthetische ersetzt werden.

Der gesamte Kristallisationsprozess kann in drei Hauptschritte eingeteilt werden: Keimbildung, Polymorphselektion und kontrolliertes Kristallwachstum. Wir gehen davon aus, dass negativ geladene Zentren (Proteine) an der Chitinmatrix sowohl für die Keimbildung als auch die Polymorphselektion verantwortlich sind. Diese negativ geladenen Zentren am Chitin werden durch Funktionalisierung von Chitin

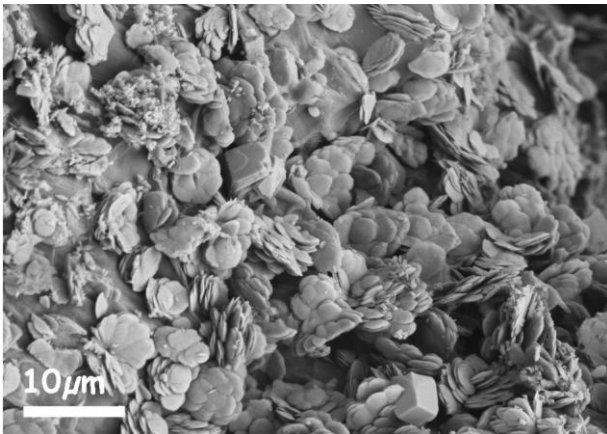


Abb. 2 Rasterelektronenmikroskopisches Bild von Calciumcarbonatkristallen, die mit Hilfe einer neuen Apparatur in eine Matrix aus Chitin kristallisiert wurden.

(Carboxymethylierung, Oxidation) ersetzt werden. Das dann folgende Kristallwachstum kann über die löslichen Proteine gesteuert werden, die ihrerseits durch Blockcopolymere ersetzt werden sollen, sobald das funktionelle Motiv in den löslichen Proteinen bekannt ist. Neue Untersuchungen dazu laufen über Computersimulation in Kooperation mit Prof. Martin Zacharias (International University Bremen).

3.2 Werkstoffentwicklung

Die perlmuttabgeleiteten Strukturregeln werden für die Entwicklung hochzäher Keramiken in Form von Folien, Membranen, Gerüststrukturen und hochtexturierten Beschichtungen genutzt. Letztere könnten bei Bedarf mit steuerbarem Abschleifungsverhalten ausgestattet werden. Vorversuche zu Oberflächenbeschichtungen auf der Basis nanostrukturierter Calciumcarbonplättchen unter Verwendung von Chitin, Chitosan und modifizierten Biopolymeren zur Substitution heutiger problematischer Bindersysteme (siehe dazu auch „Nachhaltigkeitsbewertung“) zeigten bereits erfolgversprechende Resultate. Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Workshops „Innovative Werkstoffkonzepte nach dem Vorbild der Biomineralisation“ an der Universität Bremen am 11. und 12. November 2004 präsentiert und mit Experten aus verschiedenen Arbeitsbereichen diskutiert. Als wesentliche Aufgaben für die Weiterentwicklung dieses Ansatzes wurde die Verfügbarkeit der Rohstoffe identifiziert, unter anderem auch durch Bereitstellung gentechnologisch produzierter „Prozesskatalysatoren“ (siehe 3.1 „Molekularbiologische Grundlagen“).

Dem biogenen Charakter entsprechend werden mögliche Einsatzgebiete (mit angepasstem Stoffsystem) auch im Bereich der Medizintechnik, hier insbesondere der Implantatwerkstoffe, gesehen. Die heute verwendeten nichtkeramischen Werkstoffe lassen bezüglich ihrer Biokompatibilität häufig Wünsche offen. Ihre Bevorzugung gegenüber Keramik wird meist mit der eingeschränkten Zuverlässigkeit der spröden Werkstoffe begründet. Die großtechnische Umsetzung perlmuttähnlicher Keramikstrukturen wird für Bauteile hoher Schadenstoleranz angestrebt, wobei stoffliche Zusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit unter physiologischen Gesichtspunkten zu optimieren sind. Auf diesem Gebiet wurde eine weitere Zusammenarbeit mit Industriepartnern vereinbart.

3.3 Produktentwicklung

Konkrete Fortschritte zur Entwicklung neuer Produkte wurden in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner, Fa. Remmers Löningen, erzielt. Der technische Einsatz des künstlichen Perlmutter (nanostrukturierte Calciumcarbonatplättchen) wurde zunächst in Mineral- und Kalkfarben erprobt. Das künstliche Perlmutter verbessert in diesem ersten Einsatzgebiet die mechanischen und optischen Eigenschaften von Deckanstrichen und ist durch ein erhebliches Einsparpotential an vergleichsweise teuren Bindemitteln und Pigmenten auch ökonomisch interessant. Auf die weiteren Vorteile dieser neuen Produktlinie wird im Folgenden näher eingegangen.

3.4 Nachhaltigkeitsbewertung

Diese Bewertung fokussiert auf die ersten Zielprodukte unserer Kooperation mit einem Industrieunternehmen im Bereich der Mineral- und Kalkfarben. Die durch Anstrichmittel aufgetragenen Stoffe können in der Regel nicht recycelt werden. Meist handelt es sich dabei zudem um einen mehr oder minder „umweltoffenen“ Einsatz von Stoffen. Insofern haben Fragen der Ressourcenverfügbarkeit, des ressourceneffizienten Einsatzes (Auftragsmenge, Haltbarkeit) aber auch der toxiologischen bzw. ökotoxikologischen Wirkungen von Emissionen und Abfällen in der Nachhaltigkeitsbewertung einen hohen Stellenwert. Die Perlmutterwandfarbe bietet hinsichtlich der Ressourcenverfügbarkeit enorme Vorteile (Hauptressource Kalk, Ersatz von Bindemitteln und Lösemitteln auf Mineralölbasis, Ersatz von aufwendig herzustellendem TiO_2 , Ressource für Template allerdings noch nicht entschieden). Die Nutzung von Selbstorganisationsprinzipien auf der nanoskaligen Ebene, die „physiologischen“ Herstellungsbedingungen sowie die verbesserte Haltbarkeit und Abriebfestigkeit der perlmuttbasierten Dispersionswandfarbe bilden die Grundlagen zur Nutzung von Ökoeffizienzpotentialen im Bereich von 15-45% im Vergleich zu bisherigen Dispersionswandfarben (vgl. Abb. 3).

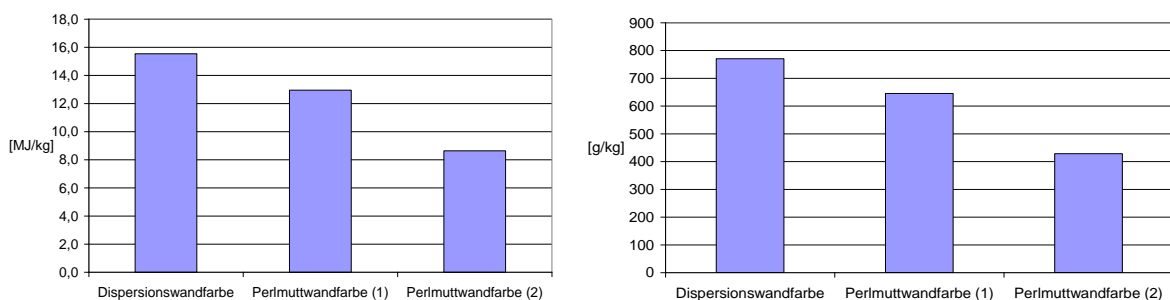


Abb. 3 Primärenergieäquivalente [MJ] und CO₂-Emissionen [g] für die Herstellung von 1 kg Wandfarbe (inkl. CO₂ aus nicht erneuerbaren Rohstoffen)¹

Quelle: Eigene Darstellung (Datenbasis: eigen sowie Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.): Vergleichende ökologische Bewertung von Anstrichstoffen im Baubereich. Band 2: Daten, SR Umwelt 232, Bern, 1995)

Außerdem reduziert der Verzicht auf die in Dispersionsfarben neben Wasser immer auch enthaltenen organischen Lösemittel die Innenraumluftbelastung. Kritisch zu begleiten sind im weiteren Fortgang der Entwicklung die ggf. auf der Basis rekombinanter Organismen erfolgende Herstellung der Template und deren Verbleib nach der Nutzungsphase des Endprodukts.

¹ Bei der Perlmutterwandfarbe (1) wird davon ausgegangen, dass das Acrylatbindemittel sowie das Lösemittel der Dispersionsfarbe zu 100% substituiert werden; bei der Perlmutterwandfarbe (2) wird zusätzlich eine 50%ige Substitution des eingesetzten Titandioxids unterstellt. Die Berechnungen für die Perlmutterwandfarbe basieren auf der Annahme, dass die Herstellung des Perlmutter ähnlich aufwendig sein wird wie die bisherige Branntkalkherstellung.

4. Diskussion und Ausblick

Bionik als Versuch, von der Natur zu lernen, kann auf verschiedenen Ebenen ansetzen. Wir können von den Ergebnissen der Evolution lernen (Klettverschluss, Fallschirm), wir können die physikalischen, chemischen, biologischen und kybernetischen Grundlagen der von Organismen entwickelten Techniken aufklären und nutzen, und wir können von der Art und Weise lernen, wie Organismen evolutionär ihre Fähigkeiten und Problemlösungen entwickelt haben (Evolutionstechnik). Der im Projekt verfolgte Ansatz gehört hinsichtlich der Aufklärung der molekularbiologischen Grundlagen zum zweiten Typ, enthält aber durch die Nutzung von Selbstorganisationsprinzipien auch Elemente des dritten.

Um auf der Basis der naturwissenschaftlichen Aufklärung molekularbiologischer Prinzipien der Perlmutterbildung in der Abalone Schnecke zu ‚technischen‘ Lösungen zu kommen, muss die Grundlagenforschung zur Biomineralisation eine gewisse ‚Reife‘ erlangt haben. Dies war mit der Aufklärung der sowohl als Template als auch als Verstärkungsmaterialien dienenden Proteine der Fall. Selbstverständlich ist auch hier noch längst nicht alles verstanden, aber es eröffnen sich die ersten Möglichkeiten für technische Anwendungen. Die ingenieurwissenschaftliche Entwicklungsarbeit konzentrierte sich auf Aspekte der Materialprüfung sowie auf die in Frage kommenden Herstellungsverfahren (skaling up). Die Anstrichmittel sind allerdings nur als ein erstes Anwendungsbeispiel zu betrachten, anhand dessen die technische und ökonomische Umsetzbarkeit der biomimetischen Mineralisation erprobt werden kann (feasability).

Die in der vergleichsweise kurzen Projektlaufzeit erzielten Ergebnisse sind viel versprechend, auch mit Blick auf alle drei Nachhaltigkeitszieldimensionen. Beiträge werden geleistet zu ökonomischer Innovation und Effizienz, zur Ressourcenentlastung und Umweltverträglichkeit sowie zum Gesundheits- und Verbraucherschutz.

Bei der nun anstehenden Fortsetzung der Entwicklungsarbeiten kommt es einerseits darauf an, das Teilprojekt Perlmutterwandfarbe bis zur Prototypentwicklung und Markteinführung weiter zu führen. Mindestens genauso wichtig aber ist das parallele Ausloten weiterer, z. T. mit wesentlich höherer Wertschöpfung verbundener, Anwendungsgebiete. Besonders nahe liegend und viel versprechend sind hier hochtexturierte, abschiefernde (Verlust-) Beschichtungen für Einsatzbereiche im Fassadenschutz (Antigraffiti) und im Schiffbau (Antifouling). Weiter gilt es, die hochinteressanten mechanischen Eigenschaften des künstlichen Perlmutter z. B. als neue Biokeramik zu nutzen, aber auch seine ästhetischen Qualitäten, den schillernden Glanz von Perlen, der das Material berühmt gemacht hat.

Projektpartner:

PD Dr. Monika Fritz, Biophysik, FB Physik, Universität Bremen

Prof. Dr. Arnim von Gleich, Technikgestaltung und Technologieentwicklung, FB Produktionstechnik, Universität Bremen

Dr.-Ing. Meinhard Kuntz und Prof. Dr.-Ing. Georg Grathwohl

Keramische Werkstoffe und Bauteile, FB Produktionstechnik, Universität Bremen

Dr. Klaus Zinsmeister, Fa. Remmers, Baustofftechnik GmbH, Lönigen