

Ilse C. Gebeshuber, Gloria Rose,  
Anna Pavlicek, André Gzásó\*

## Zusammenfassung

Dieses NanoTrust Dossier beschäftigt sich mit **bio-inspirierten und biomimetischen Nanomaterialien**. Zuerst erfolgt eine **Begriffsklärung**, in der zwischen bio-inspirierter bzw. biomimetischer Nanotechnologie und Bionanotechnologie unterschieden wird. Anschließend werden die Grundlagen bio-inspirierter und biomimetischer Nanomaterialien präsentiert. Es folgt eine **systematische Einteilung** von Synthesemethoden bio-inspirierter und biomimetischer Nanomaterialien. Diese Einteilung ist **nach der Methode der Herstellung** der Materialien angeordnet, nicht nach Funktionalität. Dies soll eine schlüssigere Korrelation mit Sicherheitsaspekten, die in vielen Fällen erst erstellt werden muss, ermöglichen. Eine Anordnung nach Materialeigenschaften oder auch Materialzusammensetzungen ist in Folge der großen Vielfalt nicht sinnvoll. Außerdem spielen neben der Chemie auch physikalische Parameter wie Größe, Struktur und Oberflächenbeschaffenheit bei der Bewertung eine wesentliche Rolle. Zusammenfassend ist zu sagen, dass **bio-inspirierte und biomimetische Nanomaterialien**, sofern die Materialentwicklung von einer entsprechenden sicherheits- und nachhaltigkeitsorientierten Technikfolgenabschätzung begleitet ist, wichtige Grundstoffe als sogenannte funktionale **Advanced Materials in Forschung, Entwicklung und Industrie** darstellen.

\* Korrespondenzautor

# Bio-Inspirierte und Biomimetische Nanomaterialien

## Einleitung

**Bionik** (auch **Biomimetik** genannt) ist das Lernen von der belebten Natur für Problemlösungen in der Technik, Wissenschaft, Architektur und Industrie. Bionik hat durch jüngste **Durchbrüche im Bereich der Nanowissenschaften und Nanotechnologie** in den letzten Jahren massiven Aufwind erhalten. Viele der funktionalen Aspekte von außergewöhnlichen biologischen Materialien, Strukturen und Prozessen basieren auf Eigenschaften im Nanobereich und können deswegen in vielen Fällen erst jetzt im Detail untersucht und verstanden werden. Diese funktionalen Aspekte von Organismen und Ökosystemen zu untersuchen, zu verstehen, ihre Grundprinzipien zu abstrahieren und anschließend in menschliche Anwendungen zu übertragen, ist die Aufgabe der Bionik. **Bioinspiration** wird breiter verstanden als Biomimetik, und umfasst auch bloße Kopien der Form. Alles Biomimetische ist auch bioinspiriert, aber nicht umgekehrt.

## Begriffsklärung

Der Verein Deutscher Ingenieure gibt mit der **Grundlagenrichtlinie VDI 6220 „Bionik – Konzeption und Strategie“**<sup>1</sup> einen geeigneten Rahmen für bionisches Arbeiten vor. Gemäß dieser Richtlinie ist der Gedanke der Übertragung von der Biologie zur Technik das zentrale Element der Bionik. Das ist ausführlich dargestellt und geregelt in der Norm DIN ISO 18458:2016-08 „Bionik – Terminologie, Konzepte und Methodik (ISO 18458:2015)“<sup>2</sup>.

Des Weiteren ist zu beachten, dass es einen fundamentalen Unterschied zwischen „**bionisch**“ und „**biobasiert**/biogen“ gibt. Ein biobasiertes/biogenes Material entsteht in direkter Herleitung aus einem Naturmaterial, wohingegen ein bionisches Material natürlich oder synthetisch hergestellt sein kann, aber in jedem Fall von Prinzipien aus der belebten Natur inspiriert ist.

Die **Fachbegriffe und Definitionen** aus der Nanotechnologie werden in diesem Dossier gemäß ISO/TS 80004-5:2011<sup>3</sup> verwendet. Dies ist ein standardisiertes Vokabular für Fachbegriffe im Bereich der Schnittstelle zwischen Nanomaterialforschung und Biologie. Es ist dafür gedacht,

die **Kommunikation** verschiedener Interessensgruppen über den Einsatz von Nanotechnologie in der Biologie bzw. Biotechnologie und der Verwendung von biologischer Materie oder biologischen Prinzipien in der Nanotechnologie zu **ermöglichen**.

Im Vorwort von ISO/TS 80004-5:2011 wird die **Wichtigkeit des Interfaces zwischen Biologie und Nanotechnologie** betont. Es ist ein ausnehmend interessantes und technologisch vielversprechendes Grenzgebiet der modernen Wissenschaft. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit medizinischen und pharmazeutischen Anwendungen, mit einem verbesserten Verständnis der Aufnahme und Verteilung von Nanoobjekten im Organismus (hier ganz besonders mit zielgenauer Ablieferung von Pharmazeutika an bestimmten Stellen im menschlichen Körper), hochsensitiven und hochgradig selektiven Sensoren und neuen fortgeschrittenen Methoden, um der Umweltverschmutzung entgegenzuwirken. Die großartigen Möglichkeiten der „natürlichen Nanotechnologie“ zeigen sich zum Beispiel am Knochen, von dem man nun weiß, dass Strukturen auf der Nanoskala stark zu seiner Funktionalität beitragen.

Am Interface zwischen „nano“ und „bio“ gibt es zwei verschiedene direktionale Vorworte, „**Nano-bio-**“ und „**Bionano-**“. Die Bezeichnung „Bionano“ bedeutet, dass die biologische Domäne die Nanodomäne beeinflusst, während „Nanobio“ darauf hinweisen soll, dass die Nanodomäne die Biodomäne beeinflusst. Ist keine der beiden Richtungen ausgezeichnet oder ist die Richtung unwichtig, wird vom **bio/nano Interface** gesprochen.

Unter **smarten Nanomaterialien** (auch bekannt als intelligente Materialien) versteht man im engeren Sinne Materialien, die auf eigene Art und Weise selbständig auf sich verändernde Bedingungen reagieren (können). Dazu gehören Temperaturänderungen, veränderte mechanische Belastungen (i.e., Beanspruchungen von außen, die auf das Material wirken, wie Druck, Zug, Scherung, Biegung oder Verdrehung) oder Änderungen im pH-Wert. Im weiteren Sinne umfassen smarte Nanomaterialien alle Stoffe, die durch ak-

tive Steuerung, wie zum Beispiel durch angelegte elektrische Spannungen, so beeinflusst werden können, wie es mit gewöhnlichen Materialien nicht möglich ist.

Die Definition der Stabilität von Nanopartikeln hängt von der angestrebten größenabhängigen Eigenschaft ab, die ausgenutzt wird, und kann nur für eine endliche Zeitspanne bestehen, da alle Nanostrukturen von Natur aus thermodynamisch und energetisch ungünstig im Vergleich zu den Bulkmaterialien (eigentlich das transportfähige Schüttgut) sind, welche unabhängig von der Größe konstante Eigenschaften haben. Als solche können Nanomaterialphasen als **metastabil**, d. h. in einem kurzlebigen energetischen Zustand relativ zu Materialien auf der Makroebene, betrachtet werden.

Ein **Kompositmaterial** (Verbundmaterial) besteht aus zwei oder mehr Bestandteilen mit deutlich unterschiedlichen physikalischen oder chemischen Eigenschaften, die in Kombination ein Material mit Eigenschaften ergeben, die sich von denen der einzelnen Komponenten unterscheiden. Die einzelnen Komponenten bleiben innerhalb der fertigen Struktur getrennt und verschieden.

**Advanced Materials** sind fortschrittliche Materialien mit besserer Leistung in einer oder mehreren Eigenschaften oder auch mit völlig neuen Eigenschaften. Sehr oft – aber nicht immer – basieren diese Eigenschaften auf nanoskaligen Funktionalitäten.

## Bio-Inspirierte Nanomaterialien

In Organismen finden sich viele Stoffe und Strukturen, die für Materialien in technischen Anwendungen als Inspiration dienen können. Biologische Materialien sind komplex, multifunktional, hierarchisch und verändern sich in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen. In den meisten Fällen sind Auswirkungen auf der Makroskala bedingt durch Funktionalitäten auf der Nanoskala.

Materialien in der Natur zeichnen sich durch vielfältige, hochkomplexe und hierarchische Strukturen aus. Besonders auf der Mikro- und Nanometerskala (1 Mikrometer = 1  $\mu\text{m}$  = 0,001 mm, 1 Nanometer = 1 nm = 0,001  $\mu\text{m}$ , 1 mm = 1.000  $\mu\text{m}$ ) zeigen biologische Strukturen Raffinesse, die derzeitige künstliche Materialien und Strukturen um ein Vielfaches übertrifft.

Forscher\*innen sowie Ingenieur\*innen wurden schon immer von außergewöhnlichen Phänomenen in der belebten Natur inspiriert. Einige waren recht einfach in die Technik zu transferieren<sup>5</sup>, bei einigen versteht man die zugrundeliegenden Prinzipien noch nicht, und selbst die rasanten Fortschritte in der Nanotechnologie helfen oft nicht weiter. In manchen Fällen, wie zum Beispiel Photosynthese und Navigation von Vögeln muss man sogar die Quantentheorie hinzuziehen, um ein grundlegendes Verständnis zu erreichen. Und

einige der wunderbaren Materialien, Strukturen und Prozesse der belebten Natur werden wir Menschen wahrscheinlich nie komplett verstehen können. Wir können zwar außergewöhnliche Eigenschaften wahrnehmen, sind aber weit davon entfernt, derartige „biologische Technologien“ mit hoher Komplexität, vollständig zu verstehen. Biomimetik ist also auch ein Schauen ins Mögliche, aber (noch) nicht Transferierbare.

Gemäß der Einschätzung von Steven Vogel, einem anerkannten amerikanischen Biomechaniker, liegt besonders in den mechanischen Wissenschaften auf der Nanoskala ein großes Potential für erfolgreiche biomimetische Zugänge. In diesem Sinne scheinen Materialwissenschaften und Nanotechnologie die vielversprechendsten Gebiete zu sein. Formen und Materialien in der belebten Natur werden Bottom-Up aufgebaut, durch eine Kombination von Bausteinen auf der Mikro- und Nanometerskala. Dadurch steht dem Organismus eine Vielfalt von hierarchisch organisierten Materialien mit einer großen Bandbreite von möglichen Eigenschaften zur Verfügung. Gerade in den Gebieten der **Kompositmaterialien** und **Advanced Materials** sind gemäß Vogel vielversprechende biomimetische Innovationen zu erwarten. Vogel erwähnt weiter als vielversprechende Gebiete muskelähnliche Aktuatoren, die chemische Energie direkt in mechanische Energie konvertieren, Robotik, gehende Vehikel, Schwimmer, die sich mit Hilfe von flexiblen Materialien durch Verbiegen weiterbewegen, und neuartige Prothesen mit Materialien und Strukturen, die den Originalgliedmaßen sehr nahe kommen<sup>6</sup>.

Begriff	Definition
Nanoskalig	Größe zwischen ca. 1 und 100 nm
Nanowissenschaft	Forschungen, Entdeckungen und Verständnis von Materie auf der Nanoskala, bei der Eigenschaften und Phänomene auftreten, die von Größe und Struktur abhängen, und die unterschiedlich sind von jenen, die mit einzelnen Atomen oder Molekülen assoziiert werden können, oder mit Bulkmaterial
Nanotechnologie	Anwendung wissenschaftlichen Wissens, um Materie auf der Nanoskala zu manipulieren, zu kontrollieren und zu synthetisieren, um die größen- und strukturabhängigen Eigenschaften und Phänomene auszunutzen, die unterschiedlich sind von jenen, die mit einzelnen Atomen oder Molekülen assoziiert werden können, oder mit Bulkmaterial
Nanomaterial	Material mit einer externen Dimension auf der Nanoskala oder mit einer internen Struktur oder Oberflächenflächenstruktur auf der Nanoskala [Nanoobjekt, nanostrukturiertes Material]
Nanobiotechnologie	Anwendung der Nanowissenschaft oder Nanotechnologie auf die Biologie oder Biotechnologie sowie auch die menschliche Gesundheit und die Tiermedizin
Bionanotechnologie	Anwendung der Biologie auf die Nanotechnologie, also die Verwendung von biologischen Molekülen in Nanomaterialien, nanoskaligen Geräten oder nanoskaligen Systemen
Bio-inspirierte Nanotechnologie, biomimetische Nanotechnologie	Anwendung von Prinzipien, die in der Biologie gefunden werden, für das Design und/oder die Fabrikation von Nanomaterialien, nanoskaligen Geräten oder nanoskaligen Systemen. Ein Beispiel dafür ist der Lotuseffekt, bei dem eine künstliche Oberfläche auf verschiedensten Nanoskalen präzise aufgeraut wird, um superhydrophobe Eigenschaften zu erreichen. Dies geschieht durch Imitation der Oberflächen von Pflanzenblättern des Lotus, der Lupinie oder der Kapuzinerkresse <sup>3, 4</sup> .
Nanotoxikologie	Anwendung der Toxikologie auf die Untersuchung von Nanomaterialien

## Biomimetische Synthesemethoden

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Synthesemethoden von biomimetischen und bio-inspirierten Nanomaterialien zu kategorisieren. Für dieses NanoTrust Dossier wurde die Einteilung nach Zan und Wu<sup>7</sup> gewählt, da sie prozessorientiert (anstatt funktionsorientiert) ist, und daher eher eine Korrelation mit Sicherheitsaspekten ermöglicht. Die fünf Hauptkategorien biomimetischer Synthesemethoden sind: 1) Elementare biomimetische Synthese von Mikro- und Nanostrukturen via biologischer Templates (Vorlagen); 2) Biomimetische Synthese durch die Kombination von weichen und harten Membranen; 3) Intelligente biomimetische Synthese über Flüssigmembranen mit Trägerstoffen; 4) Biomimetische Synthese durch lebende Pflanzen oder Mikroorganismen; 5) Bioinspirierte Synthese über die Regulierung von Biomakromolekülen.

**Tabelle 1:**  
Definition fundamentaler Begriffe bio-inspirierter Nanomaterialien basierend auf ISO/TS Norm 80004-1/2015 und ISO/TS Norm 80004-5/2011

Die bio-inspirierte Materialsynthese von Nanopartikeln verfolgt eine **Bottom-Up Strategie**<sup>8</sup> und erlaubt die **Niedertemperaturherstellung von Teilchen reproduzierbarer Größe, Kristallographie, Struktur, mit kontrollierbarer Dichte der Kristallisationskeime und der Möglichkeit der Selbstassemblierung**.

Bei der Bio-Inspiration von Nanomaterialien sind Materialien, Strukturen und Prozesse in der belebten Natur von Relevanz. Die Verfolgung milder (i.e., bei Raumtemperatur, bei pH-Werten nahe dem Neutralpunkt), effizienter und umweltfreundlicher Synthesemethoden verspricht Produkte, die dem Menschen und der Umwelt nicht schaden. Selbst für Bergbauanwendungen kann man von Pflanzen lernen<sup>9</sup>.

Derartige Verfahrenstechniken sind oft umweltfreundlicher als die konventionelle Herstellung von Nanopartikeln, die sehr oft stark reduzierende Reagenzien, oberflächenaktive Substanzen und organische Lösungsmittel verwenden<sup>3</sup>. Die mikrobielle und auch die zellfreie enzymatische Synthese von Nanopartikeln aus Gold, Silber, Palladium, Platin, Selen, Eisen, Silizium, Tellurium, Uran und Zink bietet einen „**grünen**“ **chemischen Verfahrensansatz**<sup>10</sup>.

Nachfolgend werden nun die fünf Kategorien von Synthesemethoden bio-inspirierter und biomimetischer Nanomaterialien vorgestellt, inklusive konkreter Beispiele aus der aktuellen Forschung und Entwicklung.

Elementare biomimetische Synthese von Mikro- und Nanostrukturen *via* biologischer Templates

Ein **Template** ist eine Vorlage mit gewünschten nanoskaligen Merkmalen, die Strukturen, Formen und Eigenschaften von Nanomaterialien hervorbringt, die sonst nur schwer zu erhalten sind. Indem man direkt ein biologisches Vorbild als Vorlage nimmt, können bei der elementaren biomimetischen Synthese von Mikro- und Nanostrukturen *via* biologischer Templates strukturelle Aspekte direkt übernommen werden.

Spezielle Pflanzenstrukturen können zum Beispiel dafür verwendet werden, Nanomaterialien mit spezieller Morphologie herzustellen, wie etwa Mikroskulpturen mit einem Durchmesser von zehn bis sechzig Mikrometern von magnetisch angetriebenen Mikroschwimmern. Wie eine Forschungsgruppe um Gao zeigte, kann man von einem einzigen kurzen Blattstiel über eine Million helikale **Mikroschwimmer** erhalten, die sich mit Geschwindigkeiten von ca. 250 mm/s in menschlichem Plasma bewegen können<sup>11</sup>.

Die schönen, hierarchisch aufgebauten, funktionalen Strukturen von Schmetterlingsflügelschuppen können durch relativ einfache Stempelübertragung in die Technik und Kunst transferiert werden. Periodische Nanostrukturen in der Größe der Wellenlänge des sichtbaren Lichts resultieren in strahlenden, nicht ausbleichenden Farben, die allein durch ihre Abmessungen und ihren Brechungsindex determiniert sind, unabhängig vom Material. Derartige Farben nennt man **Strukturfarben**. Dachschindelartige, gerichtete Strukturen auf der Mikrometerskala in Verbindung mit biologischen Wachsen bewirken geordnetes **Ab-rinverhalten** von Flüssigkeiten, und **Selbstreinigungseffekte** – im biologischen Template sowie auf der erzeugten Oberfläche.

Durch den Abdruck von **Spinnenfäden** in Silica<sup>12</sup> entstehen hierarchisch geordnete hohle, mesoporöse Fasern mit ein bis zwei Zentimetern Länge und ein bis zwei Mikrometern Durchmesser. Derartige Strukturen in passenden Materialien könnten evtl. dazu beitragen, Vogelschlag auf Glasflächen massiv zu reduzieren.

Technisch hergestellte Nanopartikel weisen normalerweise eine gewisse Bandbreite in Größe und Form auf. Je enger diese Bandbreite sein soll, umso schwieriger ist die Produktion und umso **höher ist der Preis**. **Pollen** gewisser Pflanzenarten haben allerdings reproduzierbare Größe und Form. Sie sind deswegen eine ideale Basis für die Herstellung hohler Nanomaterialien mit hierarchischer Porenstruktur, die infolge ihrer reproduzierbaren Größe und Form große Möglichkeiten für die kontrollierte Abgabe von Pharmazeutika bieten<sup>13</sup>.

Die elementare biomimetische Synthese von Mikro- und Nanostrukturen über biologische Templates ist eine vielversprechende Methode, da Biotemplates in großer Menge zur Verfügung stehen und daher auch Massenproduktion von Nanomaterialien erlauben<sup>9</sup>.

Biomimetische Synthese durch die Kombination von weichen und harten Membranen

Normalerweise **liefern harte Templates uniforme und vorhersagbare Strukturen**, wohingegen **weiche Templates die Produktion einzigartiger und spezieller Nanostrukturen erlauben**, mit dem Nachteil schwierigerer Kontrollierbarkeit der Uniformität und Größe<sup>9</sup>. Beispiele für weiche Templates sind Mikroemulsionen und Flüssigkristalle, Beispiele für harte Templates sind Kohlenstoffnanoröhrchen. **Kombinierte Templates** (Kombination von weichen und harten Membranen) sind poröse Strukturen mit funktionellen Gruppen an der Porenwand. Diese Membranen weisen starre Strukturen und Raumbegrenzungs-fähigkeiten auf, die den harten Tem-

plates ähnlich sind; andererseits zeigen diese Membranen durch die funktionellen Gruppen an den Porenwänden, die weiche Template-Charakteristiken sind, Modifizierbarkeit und Template induzierende Effekte. **Kombinierte Templates zeigen die Vorteile beider Herangehensweisen**. Diese kombinierten Membranen können künstlich oder natürlich sein. Bei den künstlichen kann man die Porengröße und die Membrandicke kontrollieren, bei den natürlichen hat man hochkomplexe Vorlagen, die unmöglich künstlich herzustellen sind. Auf diese Weise kann man Nanoröhrchen, ultradünne Metallfilme und verschiedenste Nano-Superstrukturen herstellen: Liu und andere haben eine blumenartige Kalziumoxalatsstruktur mit einem supramolekularen Template synthetisiert. Daraufhin wurde das Kalziumoxalat unter Erhalt der Struktur in ein core/shell  $\text{Ca-C}_2\text{O}_4/\text{CaWO}_4$  Nanokomposit mit einigen neuen optischen Eigenschaften<sup>14</sup>, wie z. B. Fluoreszenz, umgewandelt.

Eine der bekanntesten, natürlichen kombinierten Membranen ist die Hühnereierschalenmembran: semipermeabel, mit einer eingewebten Proteinfasernetzstruktur. Es gibt viele Ansätze, ihren Aufbau biomimetisch zu reproduzieren, da sie unter Umgebungsbedingungen kontrollierten Ionentransport sowie Kristallwachstum und Kristallzusammensetzung in verschiedenen Morphologien zulässt<sup>15</sup>.

Die biomimetische Synthese mit Hilfe kombinierter Membranen ist einfach, günstig und umweltfreundlich und erlaubt die Kontrolle von Größe, Morphologie und Struktur von Nanomaterialien. Dieser Prozess ist jedoch sehr langsam.

Intelligente biomimetische Synthese durch Flüssigmembranen mit Trägerstoffen

Flüssigmembranen werden seit mehr als 40 Jahren für Anwendungen der Anreicherung und Separation erforscht. Für die intelligente biomimetische Synthese von Nanomaterialien finden Emulsionsflüssigmembranmethoden (**Wasser in Öl, Öl in Wasser**) und unterstützte Flüssigmembranmethoden Anwendung<sup>16</sup>. Beide Methoden **erlauben kontrollierten Ionentransport und damit auch die direkte Beeinflussung von Übersättigung und Kristallkeimbildung**. **Mizellen** sind zusammengelagerte Molekülkomplexe (Aggregate) aus Molekülen, die sowohl hydrophile als auch hydrophobe Bereiche aufweisen. In der wässrigen Lösung im begrenzten Volumen der Mizellen, die meist mit einer Doppel-lipidmembran von der wässrigen Lösung des umgebenden Mediums getrennt sind, finden – analog zur Situation im inspirierenden Organismus – in der Emulsion elementare Vorgänge statt: Diffusion, Transport durch die Membran, kontrollierte Nukleation, Regulierung durch Templates,

Kristallwachstum und Zusammenbau<sup>9</sup>. Diese elementaren Prozesse gehören zu zwei wichtigen Vorgängen, nämlich **Transmembrantransport gegen einen Konzentrationsgradienten**, und **Biomineralisation**<sup>4</sup>. Bei der unterstützten Flüssigmembranmethode wird die Membran durch Oberflächenspannung und Kapillarkräfte in den Poren des Supportmaterials immobilisiert. Diese Methode ermöglicht sogar anisotropes Kristallwachstum mit Kontrolle der kristallographischen Achsen durch lösliche Makromoleküle, die an spezifische Kristalloberflächen binden.

Generell sind organische Nanomaterialien mit kontrollierten Formen und Größen schwierig herzustellen. Auf Mizellen basierte biomimetische Synthesemethoden zeigen jedoch großes Potential, hier Abhilfe zu verschaffen und dementsprechende Nanomaterialproduktion in industriellem Maßstab zu ermöglichen.

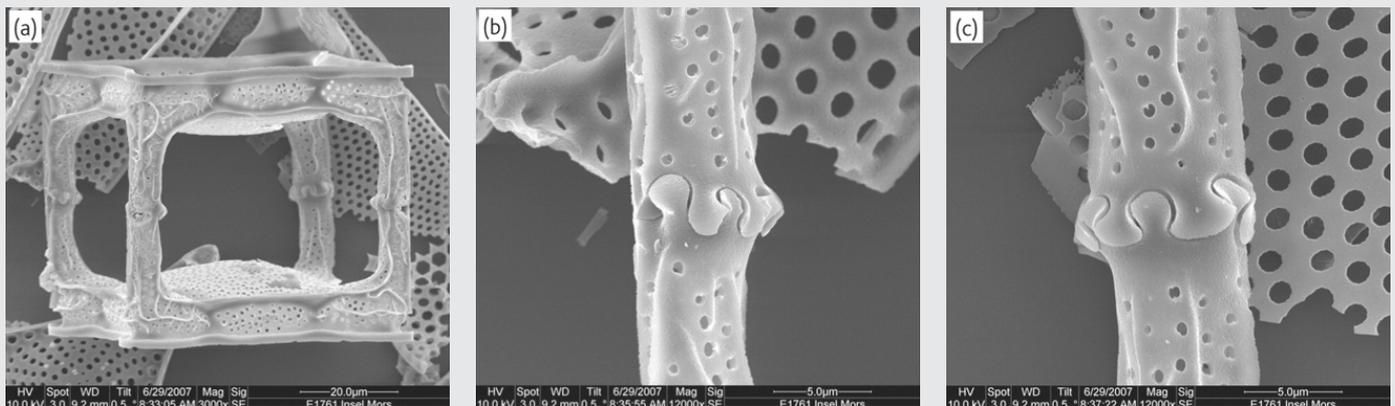
Biomimetische Synthese durch lebende Pflanzen oder Mikroorganismen

Pflanzen, Mikroorganismen, Viren und auch enzymatische Extrakte können dazu verwendet werden, metallische Nanopartikel herzustellen. Hier finden besonders pflanzliche Hyperakkumulatoren von Schwermetallen Verwendung, welche für diese Pflanzen selber ungiftig sind<sup>17</sup>. Von besonderem Interesse ist auch die **Synthese von metallischen Nanopartikeln mit Hilfe von Pflanzenextrakten**, z. B. aus Fruchtschalen, die sonst Abfall wären<sup>18</sup>.

Biomüll wird von Industrie und Forschung zusehends als Quelle bioaktiver Substanzen gesehen, mit dessen Hilfe hochwertige Nanopartikel synthetisiert werden können, mit wasser-basierter Chemie, bei Raumtemperatur und unter Umgebungsdruck. So können aus Silber- und Goldlösungen mit Abfällen des Rainfarns (*Tanacetum*

*vulgare*) Silberkugeln mit 16 nm Durchmesser und Golddreiecke mit 11 nm Kantenlänge hergestellt werden. Oder mit den jeweiligen Metalllösungen und Bananenschalen sowie Lignin, Kaffee- und Teeextrakten immer gleich geformte Nanopartikel aus Silber, Gold, Eisenoxid, Kupferoxid, Magnesiumoxid und Manganoxid.<sup>19</sup>

Dafür wird die Lösung mit den Metallsalzen bei Raumtemperatur mit der Biomülllösung vermischt. Dadurch beginnen der Prozess der Bioreduktion und die Formierung der Nanopartikel, oft erkenntlich durch einen Farbwechsel der Lösung aufgrund der Änderung der Oxidationszahl. Die Biomüllmoleküle agieren dabei auch als natürliche Tenside und fördern das Wachstum entlang spezifischer Kristallachsen. Wichtige Parameter, die einen Einfluss auf Größe und Form der Nanopartikel haben können, sind die Art und die Konzentration des Biomülls in der Lösung, die Metallkonzentration in der Lösung, die Temperatur der Mischlösung und die Reaktionszeit.



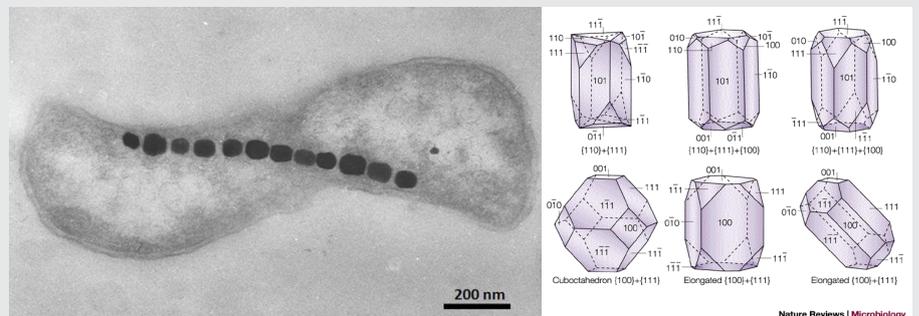
**Abbildung 1:** Kieselalgen biomineralisieren mikro- und nanostrukturiertes hydratisiertes Siliziumdioxid. Die Abbildung zeigt die fossile Schale der Kieselalge *Solium exsculptum*. ((a) gesamte Schale, (b) und (c) Vergrößerungen). *Solium exsculptum* ist zweckgemäß nanostrukturiert. © Friedel Hinz, AWI Bremerhaven. Image reproduced with kind permission<sup>20</sup>.



**Abbildung 2:** Perlen.

Perlmutter ist ein natürliches Nanoverbundmaterial, das mit Hilfe

von Proteinen und mineralischen Grundbausteinen biomineralisiert wird. © Masayuki Kato. Image reproduced with kind permission<sup>21</sup>.



**Abbildung 3:** (a) Ein magnetotaktisches Bakterium. Skalierungsbalken 200 nm. (b) Morphologie der Magnetosomkristalle, die mit atomarer Präzision biomineralisiert werden, mit Hilfe von Proteinen und mineralischen Grundbausteinen. © 2004 Nature Publishing Group. Image reproduced with kind permission<sup>22</sup>.

So können **smarte Nanomaterialien mit guter Biokompatibilität und funktionalen Eigenschaften, superstrukturierte Nanomaterialien und Nanomaterialien in metastabilen Phasen** hergestellt werden.

Biomimetische Synthese durch die Regulation von Bio-Makromolekülen

**Biominerisation** ist faszinierend. Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen erzeugen unter Umgebungsbedingungen (normale Temperatur, normaler Druck) **hochgradig kontrollierte hierarchische und komplexe Strukturen** aus verschiedensten Materialien wie Glas, Kalzit oder Magneten<sup>4</sup> (Abbildungen 1-3).

Dies geschieht oft mit Hilfe von **vorstrukturieren supramolekularen Templates oder organischen Aggregaten**. Außer in ihren einfachen Formen, also bei Fällungs- und Oxidationsreaktionen und bei Reaktionen, bei denen perfekt kristallisierte Minerale erzeugt werden, finden bei der Biominerisation teilweise **hochkomplexe**

**Proteine** Anwendung, die das Kristallwachstum kontrollieren oder induzieren, und deren Verwendung als Additive in technischen Produktionen wertvolle Einsichten in die kontrollierte Kristallbildung erlauben. Es wurden auch schon rein synthetische, bio-inspirierte Makromoleküle erzeugt, die die Biominerisation simulieren, zum Beispiel zur Erzeugung von anorganischen, organischen oder hybriden Nanomaterialien und Nanostrukturen.

Als Beispiele von Biomineralien und den jeweiligen Proteinen, die bei der Biominerisation beteiligt sind, sei Kollagen genannt, das die Formation von Apatit steuert, sowie Muschelproteine, die die Entstehung von Perlmutter (Abbildung 2) kontrollieren, und auch Silaoproteine (erzeugen Zahnbein) und Tuftelin und Enamelin (erzeugen Zahnschmelz) in Zähnen. Weiters kontrollieren eisbindende Proteine die Form und Größe von Eisstrukturen in Pflanzen, Tieren, Pilzen und Mikroorganismen, und steuert Cytochrome C die Bildung von Gold- und Urannanopartikeln<sup>7</sup>. Immer mehr derartige Proteine werden beschrie-

ben und verwendet. Allein für die Bildung von hydratisierten Siliziumdioxidstrukturen, wie sie in Kieselalgen (Abbildung 1) und Glasschwämmen auftreten, sind derzeit schon 80 verschiedene Proteine erforscht<sup>23</sup>.

Wegen ihrer **ausgezeichneten Biokompatibilität und biologischen Abbaubarkeit** sind die in der Biominerisation vorkommenden Makromoleküle auch von höchstem Interesse für die Synthese biomedizinisch anwendbarer (Nano-) Materialien, auch in hierarchisch angeordneten komplexen Architekturen. Auch Peptide in Form von Sekundärstruktur von Proteinen werden als Gerüst für Kristallkeimbildung und Kristallwachstum verwendet<sup>24</sup>. Sie können so entworfen werden, dass sie sich in einer großen Vielfalt von Nanostrukturen anordnen. Auf diese Weise können **vorhersagbare und programmierbare Materialien** ermöglicht werden. Auch DNA, RNA und Polysaccharide finden aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften Anwendung als Templates in der Biominerisation von Nanostrukturen<sup>25</sup>.

## Anmerkungen und Literaturhinweise

- VDI Richtlinie 6220 Blatt 1 „Bionik – Konzeption und Strategie“ (2012): <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/technologies-of-life-sciences/fachbereiche/bionik/richtlinienuebersicht/vdi-6220/> (Zugriff 4.3.2020)
- DIN ISO 18458:2016-08 (2015): Bionik – Terminologie, Konzepte und Methodik (ISO 18458:2015). <https://www.beuth.de/de/norm/din-iso-18458/253508997> (Zugriff 4.3.2020)
- Herrmann P. & Schmitt M. (2012): Wörterbuch Nanotechnologie. Normgerechte Definitionen mit Übersetzungen – Deutsch-Englisch/Englisch-Deutsch. DIN, Beuth Wissen, Berlin, 9. <https://www.beuth.de/de/publikation/woerterbuch-nanotechnologie/145932195> (Zugriff 5.2.2019)
- Barthlott W. und Neinhuis C. (1997): Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202(1), 1-8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s004250050096>
- Fratzl P. (2007): Biomimetic materials research: What can we really learn from nature's structural materials? *J. R. Soc. Interface.* 4(15), 637-642. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsif.2007.0218>
- Vogel S. (2000): Von Grashalmen und Hochhäusern: Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik, Wiley-VCH, 363 Seiten.
- Zan G. und Wu Q. (2016): Biomimetic and bioinspired synthesis of nanomaterials/nanostructures. *Advanced Materials* 28, 2099-2147. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adma.201503215>

## Fazit

Bio-inspirierte und biomimetische Nanomaterialien sind die Grundlage für die Entwicklung neuer, interessanter, und in vielen Fällen wirksamerer Materialien, Strukturen und Prozesse in der Medizin und Technik, bei Lebensmitteln und Kosmetik, bei Verpackung und weiteren Konsumgütern. Ihre Synthesemethoden kann man prozessorientiert folgendermaßen kategorisieren: 1) Elementare biomimetische Synthese von Mikro- und Nanostrukturen via biologischer Templates; 2) Biomimetische Synthese durch die Kombination von weichen und harten Membranen; 3) Intelligente biomimetische Synthese über Flüssigmembranen mit Trägerstoffen; 4) Biomimetische Synthese durch lebende Pflanzen oder Mikroorganismen; 5) Bioinspirierte Synthese über die Regulierung von Biomakromolekülen. Derartige Verfahrenstechniken sind oft umweltfreundlicher als konventionelle Verfahren und erlauben die Produktion von Nanomaterialien mit reproduzierbarer Größe und Struktur – dies sind Eigenschaften, die besonders wichtig sind für ihre Verwendung als Grundstoffe für funktionale Advanced Materials.

- Quednau M. (2017): Geomikrobiologie Band 2: Anwendungen: Von Urban Mining bis Nanogeoscience (de Gruyter Studium), de Gruyter, Kapitel 2.1.
- Gebeshuber I.C. (2015): Biominerization in marine organisms. Chapter 58, Part XI (Marine biotechnological products in industrial application), Springer Handbook of Marine Biotechnology, Se-Kwon Kim (Ed.), Springer, 1800 p., ISBN 978-3-642-53970-1, 1279-1300. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-53971-8\\_58](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-53971-8_58)
- Fuchs, D. (2015): Green nano: Positive environmental effects through the use of nanotechnology. Institute of Technology Assessment, *NanoTrust Dossier Nr. 045*.
- Gao W., Feng X., Pei A., Kane C.R., Tam R., Hennessy C. & Wang J. (2013): Bioinspired helical microswimmers based on vascular plants. *Nano Lett.* 2014; 14(1): 305-10. doi: 10.1021/nl404044d. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl404044d>
- Huang L., Wang H., Hayashi C. Y., Tian B., Zhao D. & Yan Y. (2003): Single-strand spider silk templating for the formation of hierarchically ordered hollow mesoporous silica fibers. *J. Mater. Chem.* 2003, 13, 666-668. <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2003/jm/b212126c#divAbstract>
- Hall S.R., Bolger H. & Mann S. (2003): Morphosynthesis of complex inorganic forms using pollen grain templates. *Chem. Commun.* 2003, 2784-85. <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2003/CC/b309877j#divAbstract>

- <sup>14</sup> Liu J.-K., Xu Z.-Z. und Wu Q.-S. (2007) Synthesis of calcium oxalate assembly structure and conversion. *Nano* 02(02), pp. 97-102. <https://doi.org/10.1142/S1793292007000428> (Zugriff 4.3.2020)
- <sup>15</sup> Yang D., Qi L. und Ma J. (2002) Eggshell membrane templating of hierarchically ordered macroporous networks composed of TiO<sub>2</sub> tubes. *Advanced Materials* 14(21), 1543-1546. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1521-4095\(20021104\)14:21%3C1543::AID-ADMA1543%3E3.0.CO;2-B](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1521-4095(20021104)14:21%3C1543::AID-ADMA1543%3E3.0.CO;2-B) (Zugriff 4.3.2020)
- <sup>16</sup> Shen Y.-X., Saboe P. O., Sines I. T., Erbakan M. und Kumar M. (2014) Biomimetic membranes: A review. *Journal of Membrane Science* 454, 359-381. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.12.019>
- <sup>17</sup> Karman S.B., Diah S.Z.M. und Gebeshuber I.C. (2015) Raw materials synthesis from heavy metal industry effluents with bioremediation and phytomining: A biomimetic resource management approach. *Advances in Materials Science and Engineering* Volume 2015, Article ID 185071(21 pages). <https://www.hindawi.com/journals/amse/2015/185071/>
- <sup>18</sup> Shakeel A., Mudasir A., Babu Lal S. und Saiqa I. (2016) A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise. *Journal of Advanced Research* 7(1), 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.02.007>
- <sup>19</sup> Ghosh P. R., Fawcett D., Sharma S. B. & Poinern G. E. J. (2017): Production of high-value nanoparticles via biogenic processes using aquacultural and horticultural food waste. *Materials* 10, 852-870. <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/8/852>
- <sup>20</sup> Bildquelle: Die Probe stammt aus der Hustedt Sammlung in Bremerhaven, Deutschland, # E1761.
- <sup>21</sup> Bildquelle: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>
- <sup>22</sup> Bazylinski D.A. and Frankel R.B. (2004) Magnetosome formation in prokaryotes. *Nat. Rev. Microbiol.* 2, 217-230. <https://www.nature.com/articles/nrmicro842> (Zugriff 4.3.2020)
- <sup>23</sup> Pamirsky I. E. & Golokhvast K. S. (2013) Origin and status of homologous proteins of biomineralization (biosilicification) in the taxonomy of phylogenetic domains. *BioMed Research International* Article ID 397278, 7 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/397278>
- <sup>24</sup> Zhang S., Marini D.M., Hwang W. und Santoso S. (2002) Design of nanostructured biological materials through self-assembly of peptides and proteins. *Current Opinion in Chemical Biology* 6(6), 865-871. [https://doi.org/10.1016/S1367-5931\(02\)00391-5](https://doi.org/10.1016/S1367-5931(02)00391-5)
- <sup>25</sup> Niemeyer C.M. (2001) Nanoparticles, proteins, and nucleic acids: Biotechnology meets materials science. *Angew. Chem. Int. Ed.* 40, 4128-4158.

## IMPRESSUM

**Medieninhaber:** Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

**Herausgeber:** Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Apostelgasse 23, A-1030 Wien; [www.oew.ac.at/ita](http://www.oew.ac.at/ita)

**Erscheinungsweise:** Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oew“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

[epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/](http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/)

NanoTrust-Dossier Nr. 054, April 2020:

[epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier054.pdf](http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier054.pdf)

ISSN: 1998-7293

Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich) Lizenz: [creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de)