

Stellungnahme in Vorbereitung der Enquetekommission „Verfahren der biomimetischen Chemie“, Freitag 27. Juni 2014, Düsseldorf

Peter Fratzl, Max Planck Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam

Vorbemerkung

Der Autor dieser Stellungnahme ist Materialwissenschaftler und nimmt daher auch im Wesentlichen diesen Standpunkt ein. Chemische Syntheseverfahren sind nicht innerhalb dieses Kompetenzfeldes und werden daher nicht oder nur sehr oberflächlich behandelt.

LANDTAG
NORDRHEIN-WESTFALEN
16. WAHLPERIODE

STELLUNGNAHME
16/1867

A23

1. Materialien der Natur

a) *Vielfalt von Strukturen statt Vielfalt von Grundstoffen*

Der Großteil der Biomasse besteht aus relativ wenigen Grundstoffen, Proteine, Polysaccharide (Zellulose und Chitin), sowie einige Biomineralien. Beispiele für natürliche Materialien sind Holz (Zellulose und andere Polysaccharide), Knochen (Protein und Kalzium-Phosphat-Mineral) oder der Panzer von Insekten und Arthropoden (Chitin). Muskel (Aktin und Myosin), Seide, Haare und Wolle (Keratin), Sehnen (Kollagen), usw. bestehen im Großen und Ganzen aus Proteinen. Muschelschalen oder Skelette von Meerestieren wie Seeigeln oder Glasschwämmen bestehen überwiegend aus Biomineralien (zum Beispiel Kalziumkarbonat oder Silica).

In Gegensatz dazu, zeichnen sich technische Materialien durch eine zunehmende Vielfalt der Grundstoffe aus: Stein, Kupfer, Bronze, Eisen bezeichnen ganze Perioden der Menschheitsgeschichte. Man könnte das durch „Stahlzeit“, „Siliziumzeit“, „Kunststoffzeit“ ins Heute fortsetzen [1]. Viele dieser Materialien, die hohe Temperaturen für ihre Herstellung benötigen (Metalle, Halbleiter, Funktionskeramiken, etc.), werden von lebenden Organismen aus verständlichen Gründen gar nicht verwendet.

b) *Hochleistungsmaterialien der Natur*

Angesichts der relativen Knappheit an Grundstoffen, welche die Natur zur Verfügung hat, stellt sich die Frage, wie es möglich ist, dass Materialien mit außergewöhnlichen Eigenschaften im Laufe der Evolution entstanden sind. Der Schlüssel ist in vielen Fällen der sehr genau kontrollierte Multiskalen-Aufbau dieser Materialien [2]. Zum Beispiel ist der Knochen über viele Skalen hinweg strukturiert, was ihm seine außergewöhnliche Bruchfestigkeit verleiht. [3]. Ein anderes Beispiel ist das Skelett gewisser Glasschwämme, wo ein spezieller Aufbau vom Nanometer- bis zum Millimetermaßstab dazu führt, dass das Glas nahezu unzerbrechlich wird [4].

Es ist also zu beobachten, dass die Evolution zu einem völlig anderen Prinzip der Adaptierung von Materialien für diverse technische Anforderungen (wie Bruchfestigkeit, Farbe, Wärmedämmung etc.) führt: während die menschliche Kultur die Grundstoffe (vor allem durch die Domestizierung des Feuers) erweitert hat, schafft es die Natur ohne starke Veränderung der Grundstoffe aber durch gezielte Strukturierung auf mehreren Skalen, eine große Palette von Materialeigenschaften hervorzubringen.

c) Natürliche Materialien sind multifunktionell

Der hierarchische Aufbau natürlicher Materialien bietet die Gelegenheit mehrere Anforderungen gleichzeitig zu erfüllen. Ein schönes Beispiel ist das Chitin in der Cuticula von Insekten und Arthropoden, die einen mechanischen Schutz (Panzer) darstellt, aber aus dem gleichzeitig Werkzeuge, und Schwingungssensoren entstehen [5]. Selbst die Farbe kann durch eine entsprechende Nanostruktur des Chitins (ohne den Zusatz von Farbstoffen) kontrolliert werden [6]. Ähnliches gilt auch zum Beispiel für unsere Hornhaut, deren Transparenz durch eine periodische Anordnung der Kollagenfibrillen erreicht wird. Die gleiche chemische Zusammensetzung ohne diese Ordnung führt in der Sklera im Augenhintergrund zu einer weißen Farbe [7].

2. Biomimetische Chemie

Mehrere Ansätze sind möglich, um einige der oben besprochenen Prozesse für technische oder vielleicht sogar industrielle Lösungen nutzbar zu machen.

a) Biomimetische Synthese

Der erste Ansatz wäre es, biologische Synthesewege einerseits nachzuahmen oder andererseits direkt (im Wege biotechnologischer Verfahren) zu nutzen. Proteine zum Beispiel können auf diese Weise hergestellt werden.

VORTEILE: Synthese meist bei Raumtemperatur und milden Umgebungsbedingungen mittels Biokatalyse (Enzyme).

NACHTEILE: Synthese oft langsam und – im Vergleich zu industriell etablierten Verfahren – wenig effizient. Wie das Fallbeispiel zeigt, ist zusätzlich zur eigentlichen chemischen Synthese oft noch eine komplexe Verarbeitung nötig, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

FALLBEISPIEL: Spinnenseide ist eines der bruchfestesten Polymere und stößt deshalb auf großes Interesse. Die Seide ist auch biokompatibel und zum Beispiel im Kontext von Wundheilung einsetzbar. Das Protein der Seide kann mittlerweile rekombinant hergestellt werden. Allerdings stellte sich bald heraus, dass die hervorragenden Eigenschaften der Seide nur dann erreicht werden, wenn die Seide im Anschluss an die Synthese auch noch in ganz

spezieller Weise prozessiert wird und damit die Struktur in einen günstigen, die Eigenschaften bestimmenden Zustand gebracht wird. Die Spinne nutzt dazu eine eigene sehr komplexe Drüse in der mechanische Scherkräfte und chemische Umgebung (pH, Salzkonzentrationen) in der richtigen Reihenfolge eingestellt werden, um die nötige Struktur zu erreichen. Das zeigt, dass die biomimetische Synthese in manchen (wahrscheinlich den meisten) Fällen auch durch eine weitere Verarbeitung zur Erreichung der geeigneten (Multi-skalen-)Struktur vervollständigt muss [8].

b) Biomimetische Strukturierung

Das ist ein sehr vielversprechendes Gebiet, auf dem schon seit etlichen Jahren intensiv geforscht wird. Das Ziel ist hier nicht primär die Synthese bestimmter chemischer Verbindungen sondern die Herstellung von speziellen Strukturen, die erwünschte Eigenschaften bedingen (entsprechend der Bemerkungen in Abschnitt 1a). Das bekannteste Beispiel ist der sogenannte Lotus-Effekt [9], wo durch eine geeignete Nanostruktur die Oberfläche eines Materials wasserabweisend gemacht werden kann. Durch Strukturierung können aber auch die optischen Eigenschaften (z.B. Farbe, Transparenz, Spiegelung) [6] oder die magnetischen Eigenschaften [10] von Materialien manipuliert werden [6]. Oberflächen können haftend [11] oder nichthaftend [12] gemacht werden. Materialien mit besonderen mechanischen Eigenschaften [13] oder mit Potential zur Selbst-Reparatur [14] können hergestellt werden.

Die inhärente Schwierigkeit mit diesem Ansatz ist, dass in der Regel Synthesewege komplett neu entwickelt werden müssen, weil entweder die Strukturen nicht aus den gleichen Grundstoffen wie im biologischen Vorbild bestehen sollen (Beispielsweise sind die haftmindernden Nanostrukturen auf der Blattoberfläche aus Wachs, was für praktische technische Anwendungen völlig ungeeignet ist), oder weil andererseits der biologische Syntheseweg nicht technisch nachgebildet werden kann.

Wenn Funktionalität durch Anpassung der Struktur (anstatt durch Anpassung der chemischen Zusammensetzung) erreicht wird, so eröffnet das grundsätzlich die Möglichkeit, die Vielfalt der Grundstoffe (Metalle, Halbleiter, Kunststoffe, seltene Erden, etc) in technischen Systemen zu reduzieren und somit die Möglichkeiten des Recycling zu verbessern. Eine stark besetzte Forschungsaktivität in diese Richtung könnte langfristig Impulse für eine nachhaltigere Materialwirtschaft setzen. Die Natur ist auch deshalb so gut in der Lage zu recyceln, weil die Vielfalt an Grundstoffen gering ist.

Zusammenfassend kann man sagen, dass biologische Materialforschung ein sehr hohes Potential für Innovationen besitzt, dass aber der Ersatz von Massenprodukten nicht unmittelbar absehbar ist. In vieler Hinsicht ist dieses Feld mit den Anfängen der Nanotechnologie vergleichbar, sowohl was das Potential als auch was die Risiken betrifft.

Das Thema braucht sowohl **starke Grundlagenforschung**, als auch **innovationsgetriebene Kooperation** mit der Industrie.

Weiterführende Informationen

Bei allen unten genannten Aktivitäten handelt es sich um Beispiele, die dem Autor ohne systematische Recherche bekannt sind. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Beispiele für Aktivitäten in der Grundlagenforschung sind Schwerpunktprogramme:

SPP1420: Biomimetic Materials Research: Functionality by Hierarchical Structuring of Materials (<http://spp1420.mpikg.mpg.de/>). Siehe auch das Lehrbuch, das aus dieser Kooperation entstanden ist [15].

SPP1568: Design and Generic Principles of Self-Healing Materials (<http://www.spp1568.uni-jena.de/>).

SPP1569: Generation of Multifunctional Inorganic Materials by Molecular Bionics (<http://www.uni-stuttgart.de/spp1569/>)

Tailored Disorder – A Science- and Engineering-based Approach to Materials Design for Advanced Photonic Applications (genehmigt April 2014)

Beispiele für Arbeitsgemeinschaften in Deutschland:

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) - Technologies of Life Sciences - Fachbereich Bionik
<http://www.vdi.de/technik/fachthemen/technologies-of-life-sciences/fachbereiche/bionik/>

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (<http://www.dgm.de/>) – Fachausschuss
Bioinspirierte und interaktive Materialien (Sprecher T. Scheibel, Bayreuth)

Kompetenznetz Biomimetik in Baden-Württemberg
(<http://www.kompetenznetz-biomimetik.de/>)

Bionik Kompetenznetz BIONON (www.biokon.net)

BMBF Initiative BIONA (<http://www.bionische-innovationen.de>)

Beispiele für Institute in USA im Bereich des Bioinspired Engineering

Wyss Institute for Bioinspired Engineering – Harvard University, Cambridge, USA
(<http://wyss.harvard.edu/>)

Center for biologically inspired design – Georgia Tech, Atlanta, USA
(<http://www.cbid.gatech.edu/>)

Zitierte Literatur

- [1] MF Ashby. Materials - a brief history. *Philosophical Magazine Letters* 88, 749-755 (2008)
- [2] P Fratzl, R Weinkamer. Nature's hierarchical materials. *Progress in materials science* 52, 1263 - 1334 (2007)
- [3] P Fratzl, HS Gupta, EP Paschalis, P Roschger. Structure and mechanical quality of the collagen-mineral nano-composite in bone. *J Mater Chem* 14, 2115 - 2123 (2004)
- [4] J Aizenberg, JC Weaver, MS Thanawala, VC Sundar, DE Morse, P Fratzl. Skeleton of *Euplectella* Sp.: Structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale. *Science* 309, 275 - 278 (2005)
- [5] P Fratzl, FG Barth. Biomaterial systems for mechanosensing and actuation. *Nature* 462, 442 - 448 (2009)
- [6] AR Parker. Optical Biomimetics. Chapter 10 in in Ref. [15], pp. 219 – 234 (2013).
- [7] K Meek. The Cornea and Sclera. In "Collagen - Structure and Mechanics", Edited by P Fratzl. Springer Science& Business. pp. 359-396 (2008)
- [8] A Smith, T Scheibel. Hierarchical protein assemblies as basis for materials. Chapter 12 in Ref. [15], pp. 219 – 234 (2013).
- [9] C Neinhuis, W. Barthlott. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* 79, 667-677 (1997)
- [10] MA Carillo, P Vach, D Faivre. Magnetic nanoparticles in bacteria. Chapter 11 in Ref [15], pp. 235 – 255 (2013)
- [11] E Kroner, E Arzt, Bio-inspired adhesive surfaces: from principles to applications. Chapter 14 in Ref. [15], pp. 310 – 321 (2013).
- [12] EV Gorb, SN Gorb. Anti-adhesive surfaces in plants and their biomimetic potential. Chapter 13 in Ref. [15], pp. 282 – 309 (2013).
- [13] AR Studart, R Libanori, RM Erb. Replicating biological design principles in synthetic composites. Chapter 15 in Ref. [15], pp. 322 – 358 (2013).
- [14] T Speck et al. Bio-inspired self-healing materials. Chapter 16 in Ref. [15], pp. 359 – 389 (2013).
- [15] P Fratzl, JWC Dunlop, R Weinkamer (editors). Materials design inspired by nature – function through inner architecture. *RSC Smart Materials Vol. 4, The Royal Society of Chemistry* (2013).

Einige Kommentare zu den Fragen der Enquete-Kommission (Nummern wie im Anschreiben)

1. Die Orientierung an der Natur kann nicht nur für Synthesewege sinnvoll sein, sondern auch in Hinblick auf die Nachahmung von funktionalen (Nano)Strukturen – siehe Stellungnahme
2. In dem Bereich der Materialien gibt es einige wenige Beispiele von kommerziellen Verfahren, die auf biologischen Vorbildern beruhen, vor allem im Bereich der Oberflächenfunktionalisierung (haftende oder wasserabweisende Oberflächen). Es gibt auch interessante schon sehr umsetzungsnahe Anwendungen für selbstheilende Materialien zum Beispiel im Straßenbau (entwickelt in einem Programm der TU Delft <http://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/iop-self-healing-materials>). Vieles ist jedoch noch im Bereich der Grundlagenforschung, die in diesem Bereich besonders interdisziplinär ist.
3. Ich wäre überrascht, wenn biomimetische Materialien ein Massenprodukt würden. Eher wird es hochwertige Nischenprodukte geben. Der Zeithorizont ist eher lang.
4. Siehe ausführliche Stellungnahme
5. Ich habe derzeit (auch mangels Kompetenz in synthetischer Chemie) keine Beispiele für einen Austausch von Verfahren. Ein wesentlicher Punkt ist auch der Umstand, dass industrielle Prozesse in vieler Hinsicht optimiert sind und daher die Latte für Veränderungen sehr hoch liegt.
6. Vermutlich kann es in einigen Bereichen Verbesserungen der Funktionalität von Materialien geben (siehe Punkt 2). Zu den Kosten kann ich keine qualifizierte Stellungnahme abgeben.

Zu den Fragen 7 bis 9 ist keine qualifizierte Stellungnahme möglich.

Potsdam, im Juni 2014

Prof. Dr. Dr.h.c. Peter Fratzl