



acatech DISKUSSION

# Materialforschung: Impulsgeber Natur

Innovationspotenzial biologisch inspirierter  
Materialien und Werkstoffe

Peter Fratzl, Karin Jacobs, Martin Möller,  
Thomas Scheibel, Katrin Sternberg (Hrsg.)



Peter Fratzl, Karin Jacobs, Martin Möller, Thomas Scheibel,  
Katrin Sternberg (Hrsg.)

## **Materialforschung: Impulsgeber Natur**

Innovationspotenzial biologisch inspirierter Materialien  
und Werkstoffe

acatech DISKUSSION

Ebook (PDF)-Ausgabe:

ISBN 978-3-8316-7652-1 Version: 1 vom 04.05.2021

Copyright© utzverlag 2021

Alternative Ausgabe: Softcover

ISBN 978-3-8316-4727-9

Copyright© utzverlag 2019

acatech DISKUSSION

# Materialforschung: Impulsgeber Natur

Innovationspotenzial biologisch inspirierter  
Materialien und Werkstoffe

Peter Fratzl, Karin Jacobs, Martin Möller,  
Thomas Scheibel, Katrin Sternberg (Hrsg.)



## Die Reihe acatech DISKUSSION

Diese Reihe dokumentiert Ergebnisse aus Symposien, Arbeitskreisen, Workshops und weiteren Veranstaltungen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Die Bände dieser Reihe liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeberinnen und Herausgeber sowie Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter [www.acatech.de/publikationen](http://www.acatech.de/publikationen) zur Verfügung.

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung und Forschungsfelder</b>	<b>9</b>
<b>Projekt</b>	<b>12</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>14</b>
<b>2 Chemische Synthese</b>	<b>20</b>
2.1 Die Herausforderung, lebensähnliche Materialien herzustellen	24
2.2 Konstruieren mit DNA	26
2.3 Nicht-kanonische Aminosäuren	28
2.4 Biologisch inspirierte Hybridmaterialien	29
2.5 Bioinspirierter elastischer Zement	29
2.6 Interview Lin Römer, Firma AMSilk	30
<b>3 Additive Fertigung</b>	<b>32</b>
3.1 Interview Héctor Martínez, Firma CELLINK	34
3.2 Interview Lutz Kloke, Firma Cellbricks GmbH	35
<b>4 Bioinspirierter Leichtbau</b>	<b>37</b>
4.1 Bioinspirierte Modifikation des Holzes	38
4.2 Beispiel Faserpavillon auf der Bundesgartenschau Heilbronn, 2019	39
4.3 Interview Stefan Schlichter, Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH	40
<b>5 Weiche Robotik</b>	<b>43</b>
5.1 Roboter auf der Basis von Pflanzen	45
5.2 Wie der Oktopus die weiche Robotik inspiriert	46
5.3 Interview Karoline von Häfen, Firma Festo AG & Co. KG	47
<b>6 Bioinspirierte Energiematerialien</b>	<b>49</b>
6.1 Licht als Energiequelle in der Materialentwicklung	50
6.2 Katalysatoren für die Künstliche Photosynthese	51
6.3 Optische Materialien aus Zellulose	52
6.4 Natürliche Farbstoffe aus Zellulose	53
6.5 Interview Stefan Buchholz, Firma Evonik Creavis GmbH	55



<b>7</b>	<b>Haften und Kleben</b>	<b>56</b>
7.1	Haare mit unbeschränkter Haftung	58
7.2	Bioinspirierte Haftstrukturen für Robotik und Industrie 4.0	60
7.3	Muschelinspirierte Adhäsion	61
7.4	Reibungsreduktion und Antifouling mit bionischer Beschichtung	62
7.5	Bioinspirierte Grenzflächenmoleküle	63
<b>8</b>	<b>Biologisch inspirierte Biomaterialien für medizinische Anwendungen</b>	<b>64</b>
8.1	Konzepte für Gewebeersatz und Regeneration	65
8.2	Die Rolle des Knochenmaterials bei der Metastasenbildung von Brustkrebs	67
8.3	Elektrospinnen von Biomaterialien als biomimetisches Konzept	69
8.4	Biologisierte Medizinprodukte für die Blutbehandlung	71
8.5	Das bionische Ohr – Wiederherstellung des Hörvermögens durch biologisierte Technik	72
8.6	Biologisch inspirierte faserbasierte Strukturen für die regenerative Medizin	73
<b>9</b>	<b>Intelligente Materialsysteme und Künstliche Intelligenz</b>	<b>75</b>
9.1	Metamaterialien und Programmierbare Materialien	76
9.2	Chancen und Grenzen einer biointelligenten Wertschöpfung in der Logistik	77
9.3	Organische iontronische Elemente für neuromorphes Computing	78
9.4	Interview Henk Jonkers, Firma Green Basilisk	80
<b>10</b>	<b>Interdisziplinäre Aspekte: Geisteswissenschaften und Gestaltungsdisziplinen</b>	<b>82</b>
10.1	Materie und Information	83
10.2	Aktive Materie	84
10.3	Bioinspirierte Materiomik	86
10.4	Design mit Faserstrukturen	89
10.5	Bildung an der Schnittstelle zwischen Biologie und Materialwissenschaften	90
10.6	Wirtschaftswissenschaften und bioinspirierte Materialforschung	92
10.7	Interviews mit Mitarbeitern der Firma BASF SE	93
10.7.1	Interview Jens Rieger, Firma BASF SE	93
10.7.2	Interview Andreas Mägerlein und Alex Horisberger, BASF designfabrik®	94
10.7.3	Interview Andreas Wüst, BASF SE	95

<b>11 Bibliometrie, Förderprogramme, Verbände</b>	<b>97</b>
11.1 Literaturrecherche	97
11.2 Patentrecherche	98
11.3 Ausgewählte DFG-Förderprogramme	99
11.4 Ausgewählte Förderaktivitäten des Bundes	102
11.5 Interviews Verbände und Institute	103
11.5.1 Interview Frank O. R. Fischer, DGM	103
11.5.2 Interview Kurt Wagemann, DECHEMA	104
11.5.3 Interview Ljuba Woppowa, VDI	105
11.5.4 Interview Viola Bronsema, BIO Deutschland e.V.	106
11.5.5 Interview Alexander Böker, Fraunhofer IAP	107
<b>12 Internationale Perspektiven</b>	<b>109</b>
12.1 Interview Don Ingber, Wyss Institute at Harvard University, Boston, USA	109
12.2 Interview Robert Full, UC Berkeley, USA	111
12.3 Interview Lei Jiang, Beihang University, China	113
12.4 Interview Xiaodong Chen, Nanyang Technological University, Singapur	114
12.5 Interview Olli Ikkala, Aalto University, Finnland	115
12.6 Interview João Mano, Universität Aveiro, Portugal	117
12.7 Interview Sybrand van der Zwaag und Santiago Garcia Espallargas, TU Delft, Niederlande	118
12.8 Interview Hisashi Yamamoto, Chubu University, Japan	120
<b>Anhang</b>	<b>122</b>
Abbildungsverzeichnis	122
Tabellenverzeichnis	124
<b>Literatur</b>	<b>125</b>



# Vorwort

Die Natur ist seit jeher Quelle und Impulsgeber für Erfindungen und Innovationen. Dies gilt für die Herstellung nachhaltiger Produkte auf Basis von biogenen Ausgangsstoffen ebenso wie für die Entwicklung bioinspirierter Materialien und Werkstoffe, zum Beispiel für den Leichtbau im Gebäude- und Transportsektor, für neuartige Oberflächen bis hin zur Gesundheitsversorgung. Viele Produkte, bei denen die Biologie als Ideengeber für die Materialforschung diente, nutzen wir bereits seit Längerem: Klettverschluss oder wasserabweisende Lacke und Oberflächen inspiriert vom Lotusblatt sind bekannte Beispiele für die Nachahmung der Natur, also Bionik im engeren Sinne.

In den letzten Jahren konnten sowohl die Lebens- als auch die Technikwissenschaften von dynamischen Entwicklungen in den sogenannten Enabling Technologies profitieren – Beispiel Biotechnologie: Seit den neunziger Jahren haben molekularbiologische Erkenntnisse und Prozesse aus den Lebenswissenschaften in Verbindung mit Werkzeugen aus ganz anderen Bereichen wie Verfahrenstechnik, Automatisierung und insbesondere Digitalisierung zu enormen Fortschritten gerade auch in Deutschland geführt.

Weitergehende Perspektiven für bioinspirierte Materialwissenschaften ergeben sich vor allem durch die Anwendung biotechnologischer Verfahren, neue Fertigungsmöglichkeiten wie 3D-Druck und zunehmende Digitalisierung. Dazu bedarf es moderner, hocheffizienter Analysemethoden, semi-automatischer Systeme sowie der Auswertung von erheblichen Datenmengen.

**Prof. Dr. Dieter Spath**  
Präsident acatech

Wenn biologische Materialien und Prozesse immer besser untersucht und verstanden sowie gegebenenfalls modifiziert und technisch weiterentwickelt werden, dann sind neue Anwendungen möglich: So können zum Beispiel „intelligente“ Materialien entstehen, die mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung treten. Es gilt insbesondere, das Innovationspotenzial von „Bits meets Bio“ zu nutzen, und das nicht nur im medizinischen Bereich.

Zudem kann biologisch inspirierte Materialforschung eine wichtige Rolle für die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen und die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung spielen. Bei der Entwicklung von Produkten sind künftig Reparaturmechanismen, Wiederverwendbarkeit oder Abbaubarkeit von Beginn an mitzudenken. Materialien sind daher ein Schlüssel für die Entwicklung nachhaltiger Produkte und können einen bedeutenden Beitrag für die aktuelle „Circular Economy Initiative Deutschland“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung leisten.

Das vorliegende Diskussionspapier zeigt vielfältige Beispiele aus den unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen – von Chemie und Energie über Medizin und Robotik bis hin zu Kunstwissenschaften und Design. Die Bandbreite untermauert eindrucksvoll die Interdisziplinarität und das große Innovationspotenzial dieses Forschungsbereichs. Deutschlands gute Position in der Forschung sollten wir in nachhaltige Wertschöpfung übersetzen.

Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen Mitwirkenden, den Autorinnen und Autoren, den weiteren Fachleuten aus Wissenschaft, Verbänden und Unternehmen, die für Interviews zur Verfügung standen, sowie bei dem gesamten Projektteam herzlich bedanken.

**Prof. Dr. Martina Schraudner**  
Vorstandsmitglied acatech



# Zusammenfassung und Forschungsfelder

## Innovationspotenzial biologisch inspirierter Materialien und Werkstoffe

**Peter Fratzl, Karin Jacobs, Martin Möller, Thomas Scheibel, Katrin Sternberg**

Materialien und Werkstoffe spielen in fast allen Technikbereichen und Produkten schon heute eine entscheidende Rolle, und ihre Bedeutung wird in unserem Alltag noch weiter zunehmen: Demografische Entwicklung, knapper werdende Ressourcen sowie Klimawandel erfordern eine nachhaltigere Wirtschaftsweise, zu der die Material- und Werkstoffforschung zukünftig einen noch größeren Beitrag zu leisten hat. Stichworte wie effizientere Materialsynthese und materialsparende Werkstoffproduktion, recycelbare oder biologisch abbaubare Produkte, intelligente, das heißt selbstreparierende beziehungsweise sich adaptierende Materialien oder auch eine zunehmende Individualisierung, zum Beispiel im medizinischen Bereich, machen deutlich: Mit den sich ändernden Anforderungen steigt auch die zu beherrschende Komplexität in der Material- und Werkstoffforschung.

Bereits heute weiß die Forschung, wie Materialzusammensetzung und Struktur auf der einen sowie Eigenschaften und Funktion auf der anderen Seite zusammenhängen. Sie kann Fortschritte bei Synthese- und Fertigungsverfahren über verschiedenste Größenskalen hinweg vorweisen, an die Leistungsfähigkeit der Natur reicht dies allerdings noch lange nicht heran. In der Natur wird eine Vielzahl äußerst komplexer Strukturen mit wenigen Bausteinen auf effiziente Weise synthetisiert, die zugleich unterschiedliche Funktionen und Adaptionseigenschaften haben. Sie wartet mit kreislauffähigen Materialien auf und vereint auf mitunter erstaunliche Art und Weise Effizienz und Funktionalität in einem System.

Daher birgt die sogenannte Biologisierung der Materialforschung – das heißt, sich von der Natur inspirieren zu lassen, wie biologische Ressourcen, Prinzipien und Verfahren genutzt werden können – große Innovationspotenziale für den Forschungs- und Wirtschaftsstandort Deutschland.

Erste Erfolgsbeispiele, etwa der steigende Anteil an bioinspirierten Synthesebausteinen und Polymeren, machen deutlich, dass die Neuausrichtung der Materialforschung bereits begonnen hat und alle wichtigen Zukunftsfelder, wie beispielsweise den Leichtbau, die Medizin, die Robotik oder den Energiebereich, adressiert.

Im Verbund mit zunehmender Digitalisierung und fortschreitender Künstlicher Intelligenz können beispielsweise Materialien entwickelt werden, die bereits Informationen über die spätere Nutzung enthalten. Dies verspricht Fortschritte in der Additiven Fertigung wie bei 3D-Druckverfahren von zum Beispiel Geweben. Selbstorganisationsprozesse sowie neue selbstheilende Materialien mit erhöhter Lebensdauer spielen nicht nur für den Medizin- und Pharmabereich eine Rolle, sondern werden zunehmend in allen Technologiebereichen eingesetzt. Effizientere, skalenübergreifende Prozessverfahren zur gezielten Nano- und Mikrostrukturierung von Oberflächen können bei der Entwicklung von Kleb- und Haftstoffen, aber auch für die Oberflächenbehandlung von Schiffsrümpfen zur Anwendung kommen. Die weiche Robotik erlaubt es, eine oftmals eher mechanisch starre Struktur mit flexibleren, an die Umgebung adaptierbaren Komponenten zu versehen.

Diese ausgewählten Beispiele machen deutlich: Bioinspirierte Material- und Werkstoffe haben das Potenzial, den deutschen Forschungs- und Technologiestandort in den nächsten Jahren maßgeblich zu prägen. Vergleichbar mit der Digitalisierung werden sie einen wichtigen Beitrag für die Ziele der Hightech-Strategie 2025, die ressortübergreifende Agenda „Von der Biologie zur Innovation“, die sich derzeit im Aufbau befindet, und die zu entwickelnde Roadmap „Circular Economy“ der Bundesregierung leisten. Mit seiner auch im internationalen Vergleich exzellent aufgestellten Forschungslandschaft bieten sich für den Wirtschafts- und Innovationsstandort Deutschland beste Voraussetzungen, um in diesem für Akademie, Start-ups, mittelständische Unternehmen und Industrie wichtigen Zukunftsfeld ein bedeutendes Wort mitzureden. Hinzu kommen ausgeprägte Kompetenzen in den Bereichen Verfahrenstechnik, Biotechnologie sowie Industrie 4.0, die in Kombination mit innovativen Materialien, unter anderem im Hinblick auf Ressourcenschonung, mittelfristig Wettbewerbsvorteile für Deutschland bringen werden. Mit ersten industriellen Anwendungen sowie einer gerade im akademischen Bereich exzellent aufgestellten Grundlagenforschung hat Deutschland die Chance, sich eine internationale Spitzenposition in der Material- und Werkstoffforschung zu sichern und diese weiter auszubauen.



Damit sich das Innovationspotenzial der Materialwissenschaften auch in Patenten, unternehmerischen Aktivitäten, Produkten, Kundennachfrage und Arbeitsplätzen niederschlägt, bedarf es übergreifender Prozesse, die die verschiedenen Disziplinen und Verfahrensschritte über die gesamte Wertschöpfungskette ressortübergreifend und integriert betrachten. Den Diskussionsbeiträgen ist zu entnehmen, wie wichtig gerade in diesem Forschungsbereich interdisziplinäre Ansätze sind. In der Wissensvermittlung müssen neue Formate für disziplinübergreifende Zusammenarbeit in Forschung und Lehre erarbeitet werden. Neben der Verfahrenstechnik werden insbesondere Digitalisierung und Künstliche Intelligenz eine Schnittstelle zur biologisierten Materialwissenschaft darstellen und sollten Teil der notwendigen Grundlagenkompetenzen werden.

Um multidisziplinäre Forschungsansätze stärker zu fördern, gilt es, fachübergreifende Kriterien zu entwickeln. Somit werden dem interdisziplinär arbeitenden wissenschaftlichen Nachwuchs die gleichen Karrierechancen eingeräumt wie in der disziplinären Forschung, die bereits Erfolgskriterien wie Monografien, Publikationen in referierten Fachjournalen, Fachkonferenzen oder Ausstellungen etabliert hat.

Technologietransfer entsteht durch Transfer in den Köpfen und erfordert ressortübergreifende Zusammenarbeit. Gerade bei von der Natur inspirierten Materialien, welche durch individuelles Wachstum entstehen und die zu oftmals maßgeschneiderten Materialien und Produkten führen, stellt das Upscaling, also die Maßstabsvergrößerung der Herstellungsverfahren, eine besondere Herausforderung dar, die eigens erforscht und erprobt werden sollte. Dabei könnten insbesondere Start-ups durch entsprechende Unterstützung und Förderung angesprochen werden.

Um von vornherein den Gedanken der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung mitzudenken, sollte möglichst zu einem frühen Zeitpunkt in der Material- und Produktentwicklung ein Life Cycle Assessment (LCA) mitgedacht werden.

Regulatorische Entwicklungen und Zulassungsstandards sind bisher noch nicht auf die Erfordernisse responsiver, adaptiver oder selbstheilender Materialien eingestellt. Hier kann eine frühzeitige begleitende Diskussion zum gegenseitigen Verständnis hilfreich sein.

Gleiches gilt für eine Darstellung des Innovationspotenzials der biologisierten Materialforschung in der Öffentlichkeit. Wie in anderen Forschungsfeldern kann auch hier eine transparente Kommunikation den gesellschaftlichen Diskurs befördern.

Ziel dieser acatech DISKUSSION ist es, anhand von Beispielen die Vielfalt und große Bandbreite an möglichen Struktur, Funktions- und Synthesepinzipien aufzuzeigen, mit denen die Natur die Materialforschung schon heute inspiriert und in Zukunft noch weiter voranbringen wird. In verschiedenen Anwendungsfeldern werden neue materialbasierte Innovationen an der Schnittstelle von Biologie und Technik exemplarisch dargestellt, die Gesellschaft und Wirtschaft gleichermaßen zugutekommen. Zudem wird ein kurzer Überblick über den Stand der nationalen und internationalen Forschung gegeben.

Ausgehend von den Diskussionsbeiträgen der verschiedenen Autorinnen und Autoren und den mit Verbänden, Unternehmen sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern geführten Interviews hat die Projektgruppe folgende weitere Forschungsfelder identifiziert:

### 1. Biologisch inspirierte Syntheseprozesse

Werden synthetische Werkstoffe mit natürlich gewachsener Materie verglichen, so fällt auf, dass die Strukturen der Natur um einiges vielfältiger und komplexer sind. Ein wesentlicher Grund dafür ist der Wachstumsprozess, in dessen Rahmen Bausteine sukzessive zu immer größeren Einheiten zusammenfinden. Wachstum erfolgt in Umgebungsbedingungen, das heißt bei Temperatur, Druck- und Lösungsverhältnissen, die der unmittelbaren Umgebung entsprechen. Grundstoffe und Energie werden dabei direkt der Umgebung entnommen.

### 2. Multifunktionalität durch Kombination von Materialeigenschaften

Nach vielfältigen Vorbildern aus der Natur sollen unvereinbar erscheinende Eigenschaften, wie zum Beispiel hart und zäh, leicht und hochfest oder hochtemperaturbeständig, in einem Material verbunden werden. Die Herstellung soll dabei möglichst ressourcen- und energieeffizient sein. Hieraus können neue Materialentwicklungen mit bisher unbekanntem Eigenschaftskombinationen entstehen.

### 3. Neuartige aktive Eigenschaften von Materialien

Natürliche Wachstumsprozesse sind dynamisch und erlauben in der Regel eine kontinuierliche Anpassung an die Erfordernisse. Diese Anpassungsfähigkeit zeigen Pflanzen während des Wachstums und tierische Organismen sogar während des gesamten Lebens. Zum Beispiel werden durch physisches Training Muskel- und Knochenmasse an erhöhte Anforderungen angepasst. Das Studium solcher Prozesse liefert Konzepte für responsive und adaptive Materialsysteme.