

acatech DISKUSSION

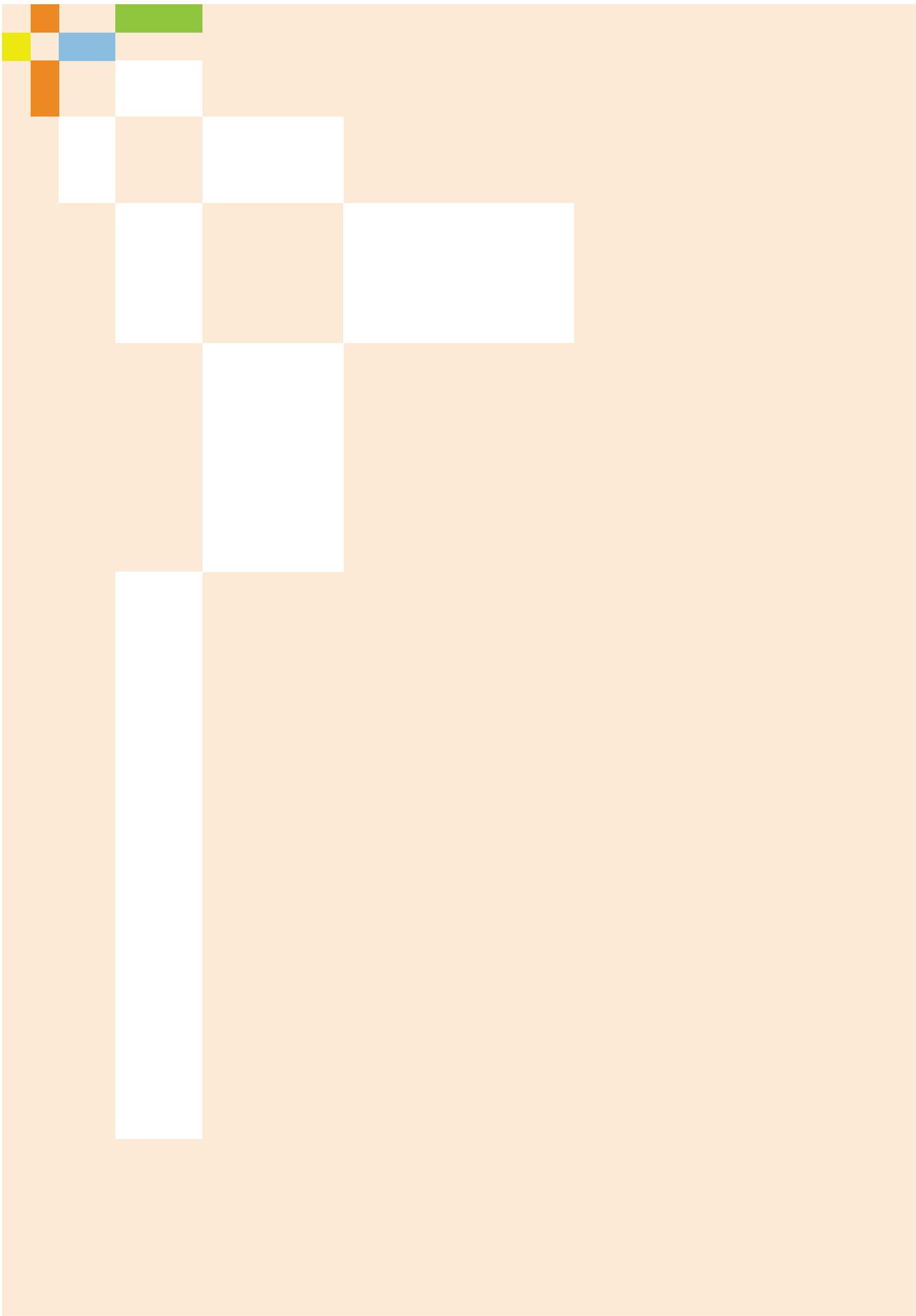
Materialforschung: Impulsgeber Natur

Innovationspotenzial biologisch inspirierter
Materialien und Werkstoffe

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

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



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 zur Verfügung.

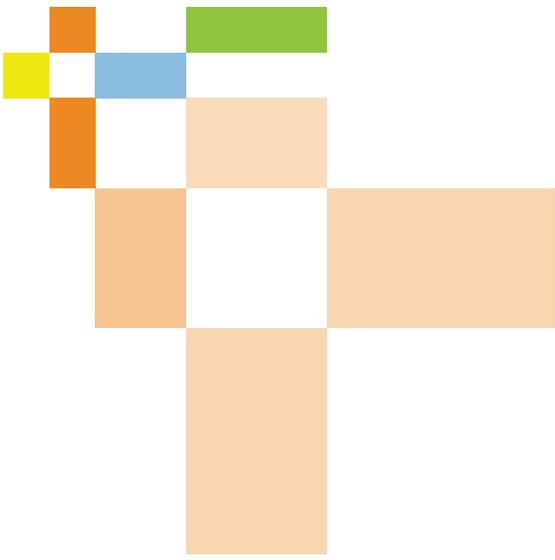
Inhalt

Vorwort	7
Zusammenfassung und Forschungsfelder	9
Projekt	12
1 Einleitung	14
2 Chemische Synthese	20
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
3 Additive Fertigung	32
3.1 Interview Héctor Martínez, Firma CELLINK	34
3.2 Interview Lutz Kloke, Firma Cellbricks GmbH	35
4 Bioinspirierter Leichtbau	37
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
5 Weiche Robotik	43
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
6 Bioinspirierte Energiematerialien	49
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



7 Haften und Kleben	56
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
8 Biologisch inspirierte Biomaterialien für medizinische Anwendungen	64
8.1 Konzepte für Gewebeersatz und Regeneration	65
8.2 Die Rolle des Knochenmaterials bei der Metastasenbildung von Brustkrebs	67
8.3 Elektrosinnen 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
9 Intelligente Materialsysteme und Künstliche Intelligenz	75
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
10 Interdisziplinäre Aspekte: Geisteswissenschaften und Gestaltungsdisziplinen	82
10.1 Materie und Information	83
10.2 Aktive Materie	84
10.3 Bioinspirierte Materiometrie	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

11 Bibliometrie, Förderprogramme, Verbände	97
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
12 Internationale Perspektiven	109
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
Anhang	122
Abbildungsverzeichnis	122
Tabellenverzeichnis	124
Literatur	125



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

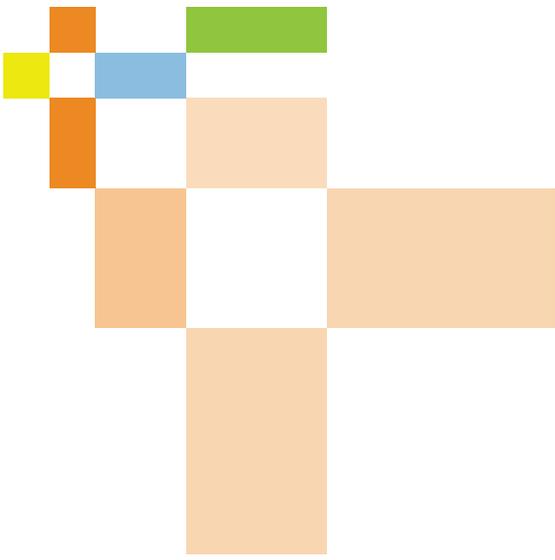
Wenn biologische Materialien und Prozesse immer besser untersucht und verstanden sowie gegebenenfalls modifiziert und technisch weiterentwickelt werden, dann sind neue Anwendungen möglich: So können zum Beispiel „intelligente“ Materialien entstehen, die mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung treten. Es 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.

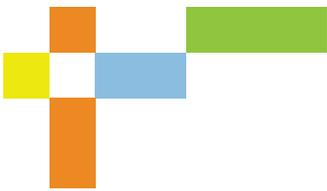
Bereits heute weiß die Forschung, wie Materialzusammensetzung und Struktur auf der einen sowie Eigenschaften und Funktion auf der anderen Seite zusammenhängen. Sie kann Fortschritte bei Synthese- und Fertigungsverfahren über verschiedenste Größenskalen hinweg vorweisen, an die Leistungsfähigkeit der 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 Fachjournals, 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 Startups 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 Syntheseprozessen 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.

4. Komplexe Materialien als technische Systeme

In der Natur verschwimmen die Begriffe von Material und System: So sind etwa Pflanzenstängel und Muskeln Material und Organ zugleich; das Wachstum erfolgt durch eine besondere Komplexität des Materialaufbaus und nimmt die zu erwartende Funktion des Organs bereits zu großen Teilen vorweg. Diesem Konzept folgend ist auszuloten, inwieweit Materialentwicklung und Systemdesign in vielen Technologiebereichen generell zusammengeführt werden können. Das Feld der Mikroelektronik kann auch als Vorbild dienen, weil hier Materialentwicklung und Systemintegration bereits Hand in Hand gehen.

5. Materialien als Informationsspeicher

Die interne Struktur biologischer Materialien, zum Beispiel Porosität, Faseranordnungen, lamellare Strukturen etc., bestimmt deren funktionale Eigenschaften und damit auch die des Gesamtsystems. Wenn diese Strukturen beim Wachstum – in technischen Systemen bei der Herstellung – der späteren

Funktion, zum Beispiel als Sensor, Aktuator oder Signalgeber, angepasst werden, ist die Information über diese Funktion im Material gespeichert. Eine systematische Erforschung dieser analogen Informationsspeicherung verspricht große Fortschritte, insbesondere im nachfolgenden Technologiefeld.

6. Smarte Materialien als essenzieller Baustein der Digitalisierung

Aufgrund der rapide zunehmenden Digitalisierung aller technischen Abläufe kommt „intelligenten“ Materialien eine immer größere Bedeutung zu. Die bisher als Paradigma angenommene Trennung zwischen „passivem“ Material und „aktiven“ Informationssystemen wird aufgrund endlicher (Energie-)Ressourcen und Rechenkapazitäten nicht aufrechterhalten werden können. Die Struktur von Materialien wird so gestaltet werden müssen, dass sie zu hocheffizienten analogen Maschinen auf der Mikrometer- und Nanometerskala werden und damit die Flexibilität der digitalen Intelligenz ergänzen.



Projekt

Projekttitle

Erforschung des Innovationspotenzials der Biologisierung in den Material- und Werkstoffwissenschaften

Projektleitung

- Prof. Dr. Peter Fratzl, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung

Projektgruppe

- Prof. Dr. Peter Fratzl, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
- Prof. Dr. Karin Jacobs, Universität des Saarlandes
- Prof. Dr. Martin Möller, Leibniz-Institut für interaktive Materialien
- Prof. Dr. Thomas Scheibel, Universität Bayreuth
- Prof. Dr. Katrin Sternberg, Aesculap AG

Autorinnen und Autoren

- Prof. Dr. Markus Antonietti, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
- Prof. Dr. Eduard Arzt, INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien GmbH
- Prof. Dr. Paul W. M. Blom, Max-Planck-Institut für Polymerforschung
- Prof. Dr. Aldo R. Boccaccini, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr. Markus J. Buehler, Massachusetts Institute of Technology MIT
- Prof. Dr. Ingo Burgert, ETH Zürich
- Prof. Dr. Chokri Cherif, Technische Universität Dresden
- Prof. Dr. Helmut Cölfen, Universität Konstanz
- Prof. Dr. Hendrik Dietz, Technische Universität München
- Prof. Dr. Claudia Doblinger, Technische Universität München
- Prof. Dr. Christoph Eberl, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

- Prof. Dr. Claudia Fischbach-Teschl, Cornell University
- Prof. Dr. Peter Fratzl, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
- Dr. Michael Friedman, Humboldt-Universität zu Berlin
- Prof. Dr. Magnus Fröhling, Technische Universität München
- Dr. Paschalis Gkoupidenis, Max-Planck-Institut für Polymerforschung
- Prof. Dr. Sebastian J. Goerg, Technische Universität München
- Prof. Dr. Stanislav Gorb, Universität Kiel
- Prof. Dr. Jürgen Groll, Universität Würzburg
- Prof. Dr. Matthew Harrington, McGill University
- Dr. René Hensel, INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien GmbH
- Prof. Dr. Karin Jacobs, Universität des Saarlandes
- Dr. Tobias Keplinger, ETH Zürich
- Prof. Dr. Jan Knippers, Universität Stuttgart
- Dr. Karin Krauthausen, Humboldt-Universität zu Berlin
- Prof. Dr. Cecilia Laschi, Sant'Anna School of Advanced Studies
- Prof. Dr. Thomas Lenarz, Medizinische Hochschule Hannover
- Prof. Dr. Karl Leo, Technische Universität Dresden
- Prof. Dr. Markus Linder, Aalto University
- Dr. Liliana Liverani, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Dr. Barbara Mazzolai, Istituto Italiano di Tecnologia
- Prof. Dr. E. W. Meijer, Eindhoven University of Technology
- Prof. Achim Menges, Universität Stuttgart
- Prof. Dr. Martin Möller, Leibniz-Institut für interaktive Materialien
- Dr. Karsten Moh, INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien GmbH
- Andreas Nettsträter, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
- Dr. Richard M. Parker, University of Cambridge
- Christian Prasse, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
- Prof. Christiane Sauer, weißensee kunsthochschule berlin
- Prof. Dr. Wolfgang Schäffner, Humboldt-Universität zu Berlin
- Prof. Dr. Thomas Scheibel, Universität Bayreuth
- Prof. Dr. Thomas Schimmel, Karlsruher Institut für Technologie
- Dr. Detlef Schumann, Aesculap AG
- Prof. Dr. Metin Sitti, Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme
- Dr. Olga Speck, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Prof. Dr. Thomas Speck, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

- Prof. Dr. Katrin Sternberg, Aesculap AG
- Dr. Markus Storr, Gambro Dialysatoren GmbH, Baxter International Inc.
- Prof. Dr. Michael ten Hompel, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
- Dr. Silvia Vignolini, University of Cambridge
- Prof. Dr. Carsten Werner, Leibniz-Institut für Polymerforschung
- Dr. Marc-Denis Weitze, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Birgit Wiltschi, ACIB – Austrian Centre of Industrial Biotechnology
- Prof. Dr. Cordt Zollfrank, Technische Universität München

Interviewpartnerinnen und -partner sowie weitere Expertinnen und Experten

- Dr. Horst Beck, Henkel AG & Co. KGaA
- Prof. Dr. Alexander Böker, Fraunhofer IAP
- Dr. Viola Bronsema, BIO Deutschland e. V.
- Prof. Dr. Stefan Buchholz, Evonik Creavis GmbH
- Prof. Dr. Xiaodong Chen, Nanyang Technological University
- Dr. Frank O. R. Fischer, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V. (DGM)
- Prof. Dr. Robert Full, University of California, Berkeley
- Prof. Dr. Santiago J. Garcia Espallargas, TU Delft
- Karoline von Häfen, Festo AG & Co. KG
- Alex Horisberger, BASF SE
- Prof. Dr. Olli Ikkala, Aalto University
- Prof. Dr. Don Ingber, Wyss Institute at Harvard University
- Prof. Dr. Lei Jiang, Beihang University
- Prof. Dr. Henk Jonkers, TU Delft & Green Basilisk
- Dr. Lutz Kloke, Cellbricks GmbH
- Andreas Mägerlein, BASF SE
- Prof. Dr. João Mano, CICECO – Aveiro Institute of Materials
- Dr. Héctor Martínez, CELLINK
- Dr. Carsten Momma, CORTRONIK GmbH
- Dr. Heinz Müller, CORTRONIK GmbH
- Dr. Jens Rieger, BASF SE
- Dr. Lin Römer, AMSilk GmbH
- Dr. Oliver Schauerte, Volkswagen Aktiengesellschaft
- Prof. Dr. Stefan Schlichter, Institut für Textiltechnik Augsburg gemeinnützige GmbH
- Prof. Dr. Sybrand van der Zwaag, TU Delft
- Prof. Dr. Kurt Wagemann, DECHEMA

- Dr. Ljuba Woppowa, VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences
- Andreas Wüst, BASF SE
- Prof. Dr. Hisashi Yamamoto, Chubu University

Projektkoordination

- Dr. Lena Simon, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
- Dr. Christine Metz-Schmid, acatech Geschäftsstelle

Redaktionelle Mitarbeit, Interviews und Übersetzungen

- Dr. Lena Simon, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung

Weitere Mitarbeit

- Johannes Simböck, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Martina Kohlhuber, acatech Geschäftsstelle
- Farras Fathi, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Khashayar Razghandi, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung

Projektlaufzeit

12/2018–01/2020

Förderung

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Förderkennzeichen
13XP5083

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



1 Einleitung

Materialien und Werkstoffe begegnen uns in fast allen Lebensbereichen und stellen die Basis für die meisten technischen Systemlösungen dar, die uns im Alltag umgeben. Unsere moderne Infrastruktur und Architektur in Großstädten wäre beispielsweise ohne Stahlwerkstoffe undenkbar. Kunststoffe haben viele Produkte für breite Bevölkerungsschichten erschwinglich gemacht. Transistoren aus Halbleitern eröffneten das Zeitalter der Informationstechnik und Digitalisierung. Studien zeigen, dass auf die Entwicklung von Materialien rund siebenzig Prozent aller Innovationen zurückzuführen sind.

In Deutschland wird in material- und werkstoffbasierten Branchen jährlich ein Umsatz von etwa einer Billion Euro erzielt. Rund fünf Millionen Arbeitsplätze hängen davon ab.¹ Für das in Deutschland so wichtige verarbeitende Gewerbe betrug der Anteil an Materialkosten im Jahr 2011 etwa 45 Prozent der Gesamtkosten.² Diese gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung begründet auch, dass ein entsprechend hoher Anteil der Fördermittel für die akademische Forschung in diesen Bereich einfließt: Rund zwanzig Prozent der gesamten Mittel der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zwischen 2014 und 2016 in den Ingenieurwissenschaften gingen an das Fachgebiet Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.³

War in der Vergangenheit die Entwicklung neuer Materialien prägend für die gesellschaftliche Entwicklung und den Aufbau unserer industriellen Zivilisation, so sind es heute die sozio-ökonomischen und ökologischen Anforderungen, welche die Richtung für zukünftige Innovationen auf Basis neuer Materialien vorgeben. Dies ist nicht zuletzt auf endliche Ressourcen, steigende Klimaschutzanforderungen und entsprechende nationale und internationale Nachhaltigkeitsziele zurückzuführen, die auch Produktion und Verbrauch von Produkten umfassen. Stichworte sind Kreislaufwirtschaft, Recycling und Abbaubarkeit von Materialien. Das geht mit immer vielfältigeren Anforderungen an moderne Werkstoffe einher, die nur durch eine immer größere strukturelle Komplexität der Werkstoffe selbst erfüllt werden können. Hierfür brauchen wir neue Herstellungstechnologien und für deren Entwicklung neue Denkweisen. Die Vielfalt der Natur mit ihren sich ständig anpassenden Strukturprinzipien und den daraus abgeleiteten hochentwickelten Funktionseigenschaften zeigt uns hier neue Wege für das Design, die Synthese und

die Verarbeitung von Werkstoffen auf, die letztlich alle Schritte vom Molekül bis zum Bauteil integrieren müssen.

Die Natur fasziniert und inspiriert mit einer Vielzahl spezialisierter biologischer Einzel- und Systemlösungen, die sich in einer seit Millionen von Jahren vollziehenden biologischen Evolution an die sie umgebende Umwelt angepasst haben. Im Laufe ihrer Entwicklungsgeschichte ist es lebenden Organismen gelungen, ihren Aufwand an Energie und Ressourcen zu reduzieren, intelligente Strategien der Informationsverarbeitung und des Recyclings zu entwickeln sowie Stoffwechselreaktionen auf engstem Raum optimal und zeitlich koordiniert ablaufen zu lassen.

Basis für diese Leistungsfähigkeit biologischer Systeme sind hochgradig parallelisierte und gleichzeitig präzise ablaufende Synthese- und Abbauprozesse, selbstlernende und meist (energie)effiziente Systeme, gezielt schaltbare Mechanismen für beispielsweise Regulation und Informationstransport sowie ein hoher Vernetzungsgrad selbstständiger Module in einem fehlertoleranten Gesamtsystem. Dies ist ein Fundus an Ideen, von dem die Material- und Werkstoffforschung lernen und profitieren kann.

Durch wissenschaftliche Fortschritte ist es heute möglich, unser zunehmendes Verständnis von biologischen Strukturen und Wachstumsprozessen für die Entwicklung neuer Materialien zu nutzen. Das hier vorliegende Diskussionspapier beleuchtet das heutige und zukünftige Potenzial, welches einer Biologisierung der Material- und Werkstoffforschung innewohnt. Dabei geht es um die Nutzung biologischer Ressourcen, Prinzipien und Verfahren bei Entwicklung, Einsatz und Recycling von Werkstoffen. Fortschritte in der Analyse von biologischen Systemen und erste Umsetzungen bionischer Anwendungen werden hierbei ebenso berücksichtigt wie die gezielte Übertragung von biologischen Prozessen und Prinzipien. Kernelemente dieses Transfers von Prinzipien der Natur in eine moderne Materialentwicklung sind

- der für die Natur charakteristische Vielkomponentenaufbau über Hierarchiestufen, der zu Materialien mit einem hohen Informationsgehalt führt und es ermöglicht, neue und spezifische Funktionen in der Materialstruktur zu kodieren,
- die Selektion „intelligenter“ (funktionierender) Strukturen durch Computersimulation und Modellierung,
- die Integration von Synthese- und Fertigungstechnologien, um solche komplexen Materialien herstellen zu können, und
- die Verträglichkeit mit der Natur sowie die Verknüpfung mit natürlichen Strukturen und Funktionen.

1 | Vgl. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V. 2015.

2 | Vgl. Weber/Oberender 2014.

3 | Vgl. Deutsche Forschungsgemeinschaft 2018 als Basis für eigene Berechnung.

Um den derzeitigen Stand dieser Entwicklungen zu beleuchten, gibt diese Publikation einen Überblick über Beiträge, die den Stellenwert einer Biologisierung in der Material- und Werkstoffforschung unterstreichen. Dies erfolgt anhand ausgewählter Anwendungsfelder und Fachbeiträge, die grundsätzlich in drei Bereiche unterteilt werden können:

1. Inspiration durch natürliche Strukturen, Synthesen und Prozesse: Bionik, biomimetische und bioinspirierte Materialien für technische Anwendungen („Materialien *durch* die Natur“)
2. Nutzung nachwachsender Rohstoffe: natürliche und bio-basierte Materialien („Materialien *von* der Natur“)
3. Anwendung als biomedizinische und Implantat-Materialien („Materialien *für* die Natur“)

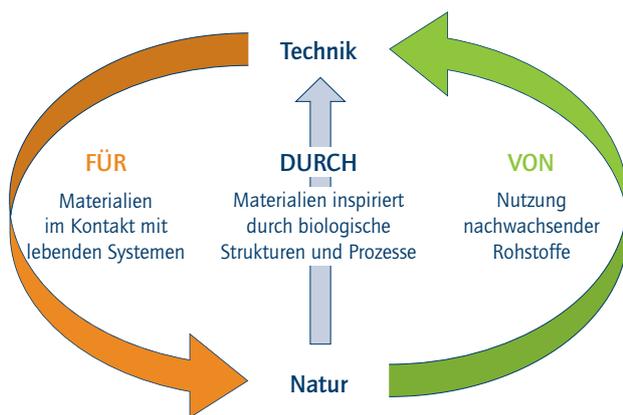


Abbildung 1: Neben der Nutzung nachwachsender Rohstoffe oder der biotechnologischen Herstellung von Materialien (Materialien VON der Natur) sowie der Entwicklung von Materialien für biomedizinische oder landwirtschaftliche Anwendungen (Materialien FÜR die Natur) stellt die biologisch inspirierte Materialwissenschaft ein besonders zukunftssträchtiges Feld für Innovationen dar (Materialien DURCH die Natur) (Quelle: Peter Fratzl, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung MPIKG).

Zukünftig wird insbesondere die Übertragung natürlicher Grundprinzipien auf die Fertigung und Verarbeitung von modernen Materialien und Werkstoffen neue, vielfältige Anwendungsperspektiven eröffnen. So kann die technische Anwendung von Evolutionsstrategien beispielsweise eine durch Mutationen hervorgerufene Optimierung von Material- und

Bauteileigenschaften ermöglichen. Dadurch können zeit- und kostenintensive Entwicklungsarbeiten deutlich reduziert werden. Das tiefere Verständnis grundlegender biologischer Materialeigenschaften wie Selbstorganisation, Reparaturfähigkeit, Anpassungsfähigkeit oder auch energieeffizienter Lebensvorgänge eröffnet neue Chancen in Fertigungstechnik, Informationsverarbeitung, Logistik sowie Ressourceneffizienz und schafft somit eine verbesserte Konkurrenzfähigkeit des deutschen Forschungs- und Industriestandorts im globalen Wettbewerb.

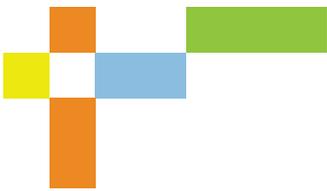
Aufgrund der rapide zunehmenden Digitalisierung aller technischen Abläufe insbesondere bei Produktionsprozessen kommt „intelligenten“ Materialien eine immer größere Bedeutung zu. Die bisher als Paradigma angenommene Trennung zwischen „passivem“ Material und „aktiven“ Informationssystemen wird aufgrund endlicher Ressourcen und Rechenkapazitäten nicht aufrechterhalten werden können. Der Anteil der digitalen Technologie am globalen Endenergieverbrauch (der um etwa 1,5 Prozent pro Jahr wächst) wird zwischen 2013 und 2020 um fast siebenzig Prozent gestiegen sein⁴ – ein Aspekt, der sich nur bedingt mit den Klimazielen der Bundesregierung in Einklang bringen lässt. So wie Gelenke Bewegungsabläufe vorbestimmen, wird die zunehmende Komplexität von Materialstrukturen Teile der Information für technische Abläufe enthalten. Materialien werden so zu analogen Maschinen auf der Mikrometer- und Nanometerskala. Das reduziert zwar die Flexibilität in den technischen Abläufen, weil die Materialstruktur nicht so leicht modifiziert werden kann, erhöht aber die Effizienz durch Einsparung von Rechenkapazität und den damit verbundenen Energieaufwand. Die Zukunft der Digitalisierung im technisch-industriellen Bereich wird ganz wesentlich von dieser Schnittstelle abhängen, zu deren Definition und Optimierung noch viel Forschungsbedarf besteht.

Biologisierte Materialforschung – einige Beispiele zum Stand des Wissens

Werden synthetische Werkstoffe mit natürlich gewachsener Materie verglichen, so fällt auf, dass die Strukturen der Natur um einiges vielfältiger und komplexer sind.⁵ Ein wesentlicher Grund dafür ist insbesondere der Wachstumsprozess, bei dem Bausteine sukzessive zu immer größeren funktionalen Einheiten zusammenfinden. Kann dieser Vergleich mit natürlichen Materialien und deren Kreisläufen für innovative Ansätze in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik genutzt werden? Welchen Beitrag zu neuen Lösungen könnte diese „Biologisierung“ der Materialwissenschaft leisten?

4 | Vgl. The Shift Project 2019.

5 | Vgl. Eder et al. 2018.



Die Betrachtung des Wachstumsprozesses mit synthetischen Herstellungsverfahren⁶ führt rasch zu einigen Schlussfolgerungen:

- Für natürliche Materialien sind hierarchisch aufgebaute Strukturen charakteristisch,⁷ das heißt, Moleküle bilden funktionale Aggregate, die wiederum zu größeren Einheiten verbunden sind.
- Der Wachstumsprozess ist dynamisch und erlaubt eine kontinuierliche Anpassung an die jeweiligen Erfordernisse.⁸ Diese Fähigkeit zeigen Pflanzen während des Wachstums und tierische Organismen sogar während des gesamten Lebens. So hat zum Beispiel physisches Training eine Anpassung von Muskel- und Knochenmasse an erhöhte Anforderungen zur Folge.
- Wachstum führt zu einer besonderen Komplexität des Materialaufbaus, welche die zu erwartende Funktion des Organs bereits zu großen Teilen vorwegnimmt. In diesem Sinne verschwimmen die Begriffe von Material und Bauteil in einem Pflanzenstängel beziehungsweise stellen eine Einheit dar. Ähnlich verhält es sich mit Muskel oder Leber: Sie sind Organ und Material zugleich. Multifunktionale Eigenschaften sind in der Natur eher die Regel als die Ausnahme.
- Wachstum erfolgt bei Bedingungen, die hinsichtlich Druck- oder Temperaturverhältnissen der Umgebung angepasst sind. Benötigte Grundstoffe und der Energiebedarf werden dabei direkt der Umgebung entnommen.

Dadurch wird offensichtlich, dass Werkstoffe nicht einfach nur Metalle, Keramiken oder Polymere sind. Dank der Möglichkeit, Grundstoffe miteinander zu kombinieren und Strukturen auf verschiedenen Größenskalen gezielt herzustellen, wächst die Zahl der Variationen an Hybridwerkstoffen und Kompositen schnell: Selbst Papier ist längst ein Komposit aus Zellulosefasern und kunststoffbasierten Bindemitteln. Voraussetzung für diese Entwicklung waren enorme Fortschritte in Synthese- und Fertigungsverfahren sowie ein immer besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen multiskaliger (über viele Größenordnungen reichende) Struktur und Eigenschaften.

Die folgende Zusammenfassung liefert anhand ausgewählter Beispiele einen Überblick über aktuelle Trends auf diesem Gebiet.⁹

6 | Vgl. Fratzl 2007.

7 | Vgl. Fratzl/Weinkamer 2007.

8 | Vgl. Weinkamer/Fratzl 2011.

9 | Zum Teil veröffentlicht in Bargel/Scheibel 2018.

10 | Vgl. Speck et al. 2012.

11 | Vgl. Zollfrank et al. 2014.

12 | Vgl. Speck/Speck 2009.

Multifunktionalität

Moderne Materialien müssen mehr erfüllen als nur einzelne Funktionen wie mechanische Festigkeit oder elektrische, optische und magnetische Eigenschaften. Die Anforderungen gehen immer mehr dahin, multifunktionelle, adaptive, interaktive und Stimuli-responsive (auf Signale reagierende) Materialeigenschaften zu kombinieren.¹⁰

Viele natürliche Materialien genügen einer Vielzahl dieser Anforderungen, da sie über exzellente primäre Materialeigenschaften wie hohe Festigkeit oder Zähigkeit verfügen, die mit sekundären Eigenschaften in komplexen multifunktionalen biologischen Systemen integriert sind. Auf diese Weise kombinieren sie verschiedene wichtige Systemmerkmale wie hohe Performanz, Schadenstoleranz, Adaptionsfähigkeit, Modularität und Multifunktionalität.¹¹ Es gibt bereits etliche bioinspirierte Materialien, die Einzug ins alltägliche Leben gehalten haben. Bekannte Beispiele sind unter anderem der Klettverschluss, der Lotus-Effekt[®] von selbstreinigenden Oberflächen, selbstreparierende Polymermembranen, das Gecko-Tape[®] zur kleberlosen reversiblen Anhaftung, Sharklet AF[™], Antifouling-Oberflächen basierend auf der Haut von Haien und die künstliche Spinnenseidenfaser BioSteel[®].

Hierarchischer Aufbau

Eine grundlegende inhärente Eigenschaft von natürlichen Materialien ist der hierarchische Aufbau über mehrere Größenskalen hinweg, die von der molekularen Ebene bis hin zum makroskopischen Aufbau reichen können. Dieses Design bewirkt eine Funktionsintegration. Spezifische Funktionen können entweder auf einer einzelnen Hierarchieebene oder mehrere Ebenen übergreifend etabliert werden.¹² Exemplarisch für hierarchisch strukturierte Systeme in der Natur seien der Aufbau von pflanzlichen Zellwänden inklusive Holz, Chitin-Panzer von Schalentieren und Insekten, Biokeramiken wie Kieselalgen sowie Knochen, aber auch reversible Anhaftungsstrukturen wie beim Gecko oder selbstreinigende Oberflächen mit Lotus-Effekt[®] genannt.

Ein etabliertes Beispiel für ein „biologisiertes“ Faserverbundmaterial ist der schwingungsgedämpfte technische Pflanzenhalm[®],

ein von der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg zusammen mit dem Textilforschungsinstitut Denkendorf entwickeltes technisches Textil. Für den technischen Pflanzenhalm® wurden als pflanzliche Vorbilder das Pfahlrohr, der Schachtelhalm und der Bambus verwendet. Die technische Übertragung basiert auf den Prinzipien „Faseranordnung im Verbund“, „gradueller Strukturgrößenübergang“ und „Leichtbau in Form von Sandwichstruktur“. Ähnlich wie armerter Stahlbeton – übrigens auch ein bionisches Material und 1867 von Joseph Monier zum Patent angemeldet – zeichnet sich der technische Pflanzenhalm® durch hohe Festigkeit und Steifigkeit sowie hohe dynamische Belastbarkeit bei enormer Schwingungsdämpfung aus.¹³

Biotemplating und Biomineralisation

Ein anderer Ansatz wird beim Biotemplating verfolgt. Unter Biotemplating werden die Verwendung von Biopolymerstrukturen und deren Umwandlung in anorganische Funktions- und Strukturmaterialien verstanden.¹⁴ Mit gängigen Methoden ist der Aufbau von technischen Werkstoffen mit einer skalenübergreifenden Multifunktionalität sowie einer komplexen Struktur nur schwierig zu verwirklichen. Ein genereller Lösungsansatz zur Herstellung komplexer, hierarchisch strukturierter Materialien ist die lokal abgegrenzte Ablagerung von festen, dauerhaften anorganischen Materialien an vordefinierten biologischen Architekturen.¹⁵ Auf diese Weise können beispielsweise biogene (Polymer-)Strukturen erzeugt und ihre Überführung in Kompositmaterialien für verschiedene technische oder biomedizinische Anwendungen vorgenommen werden. Als Beispiel für Biotemplating sei die hierarchische Strukturierung poröser keramischer Werkstoffe und Komposite genannt. Die Strukturierung erfolgt durch Nanoabformung pflanzlicher Zellwände, Vorbild ist der Kiefernzapfen. Hier bleibt sogar die aktive direktionale Bewegung durch asymmetrische Schichtung wie beim natürlichen Vorbild erhalten – wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß.¹⁶ Eine bioinspirierte Herangehensweise, die in den letzten Jahren zunehmend das Interesse der Materialwissenschaft geweckt hat, ist unter anderem die Beschichtung von regelmäßig geformten, leicht zugänglichen

Templaten mit anorganischen Verbindungen – von der Nanometer- bis zur Mikrometerskala. Dazu kommen neben Biopolymeren wie Polysacchariden oder Proteinen auch Kolloide in Betracht.¹⁷ In diesem Zusammenhang werden verstärkt Nanostrukturen wie zum Beispiel stäbchenförmige Viren zum kontrollierten Aufbau von Nanomaterialien eingesetzt.¹⁸ Ziel dabei ist eine effektive, bioinspirierte Fertigung von hierarchisch aufgebauten, faserverstärkten Verbundwerkstoffen sowie robusten, miniaturisierten technischen Anwendungen in Geräten. Die wesentlichen Herausforderungen bei der Synthese der infrage kommenden mineralisierten Nanostrukturen liegen in der Selektivität und der Einstellbarkeit der anorganischen Materialien, die auf den biologischen Templaten abgelagert werden. Dabei sind Dicke und Oberflächenprofil der resultierenden Beschichtung wichtig und eine Aggregation in unerwünschten supramolekularen erweiterten Strukturen zu vermeiden. Template wie der nanotubuläre Tabakmosaikvirus (TMV) haben sich dafür besonders gut bewährt: Seine mehrfach geladene Proteinbeschichtung kann durch eine hohe Oberflächendichtenkonjugation spezifisch mit bestimmten Peptiden, Enzymen, Farb- und Wirkstoffen oder anorganischen Komponenten funktionalisiert werden. Dadurch ergeben sich zahlreiche Vorteile für eine Reihe von technischen Anwendungen – von biomedizinischen Bildgebungsverfahren und therapeutischen Ansätzen über Batterien mit großen Oberflächen bis hin zu Biosensoren.¹⁹

Neben dem Biotemplating können für sehr kleine Strukturen im Nanometerbereich auch Moleküle für die Keimbildung und das kontrollierte Wachstum von Biomineralien eingesetzt werden; man spricht dann von Molekültemplaten.²⁰ Ein Vorbild für die bioinspirierte Synthese von Halbleitern, Nanodrähten oder -partikeln sind Radiolarien (einzellige Algen), deren Mikroskelette aus Siliziumdioxid bestehen und durch das Zusammenspiel von Lipidvesikeln und phosphat- und aminreichen Proteinen (Silafine, langkettige Polyamine und Silacidine) gebildet werden. Für die Herstellung von synthetischen Materialien werden daher bestimmte Funktionspeptide eingesetzt, die selektiv an anorganische Materialien binden und damit sowohl die Keimbildung als auch das Mineralwachstum kontrollieren.

13 | Vgl. Speck et al. 2012.

14 | Vgl. Zollfrank 2014.

15 | Vgl. Zollfrank et al. 2014.

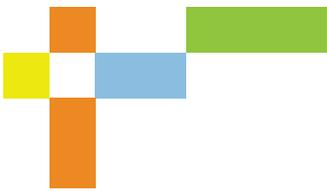
16 | Vgl. Van Opdenbosch et al. 2016.

17 | Vgl. Preiss et al. 2014.

18 | Vgl. Bittner et al. 2013.

19 | Vgl. Koch et al. 2016.

20 | Vgl. Nudelman/Sommerdijk 2012.



Interaktive und adaptive Materialien

Materialinteraktion mit einer sich verändernden Umgebung stellt einen weiteren aktuellen Forschungs- und Entwicklungszweig dar. Als interaktive Materialien bezeichnet man solche Materialien, die auf eine Umgebungsänderung (Reiz, Stimulus) mit einer unspezifischen, nicht gerichteten Reaktion antworten – auch als passive interaktive Reaktion bezeichnet. Adaptive Materialien dagegen reagieren mit einer intelligenten aktiven Antwort, die auf die veränderte Situation abgestimmt ist; sie werden deshalb auch oft als smarte Materialien bezeichnet. Interaktive und adaptive Materialien sind insbesondere solche, die intrinsische Eigenschaften als Reaktion auf einen Reiz beinhalten, darunter Selbstheilung, Selbstassemblierung, Selbstreplikation, Selbstreinigung oder Selbsterneuerung. Sie heißen daher auch Selbst-X Materialien und weisen ein hohes Innovations- und Anwendungspotenzial auf, zum Beispiel bei der Entwicklung selbstreparierender technischer Materialien nach dem Vorbild der Natur. So werden beispielsweise bionische Selbstreparaturkonzepte nach dem Vorbild wundversiegelnder pflanzlicher Latex- und Harzsysteme untersucht, um sie bei Polymerwerkstoffen in schwingungsdämpfenden oder abdichtenden Systemen einzusetzen. Das Prinzip dabei ist die Freisetzung von zwei (oder mehr) chemischen Komponenten, die als Vorrat in Mikrokapseln oder -röhren im Material eingebettet sind, bei Schädigungen (zum Beispiel Mikrorissen) lokal freigesetzt werden und polymerisieren. Dadurch kann eine weitere Rissausbreitung unterbunden und der Riss repariert werden.²¹

Biotechnologische Verfahren

Auch für die Entwicklung neuer Materialien gewinnt die moderne Biotechnologie schnell an Bedeutung. Im Zentrum der Materialforschung stehen dabei die Analyse und das Verständnis der Eigenschaften sowie intra- und intermolekulare Wechselwirkungen der Grundbausteine natürlicher Materialien. Neben biopolymeren Grundbausteinen wie Polysacchariden, Nucleinsäuren und Proteinen sind auch anorganische Biomineralien von Relevanz, die zum Beispiel in Verbundmaterialien wie Knochen, Zähnen oder Muschelschalen vorkommen. Ein wesentliches natürliches Prinzip bei der Zusammenlagerung dieser modularen Bestandteile zu größeren funktionellen Einheiten ist der Ablauf in Selbstorganisationsprozessen, zu denen auch die Selbstassemblierung zählt. Hilfsstrukturen und intermolekulare Wechselwirkungen unterstützen

diese Prozesse, die in der Natur bei generell milden Reaktionsbedingungen wie niedriger Temperatur (circa 25 Grad Celsius) und atmosphärischem Druck (circa 1.010 Millibar) ablaufen.²² Anders ausgedrückt verläuft die Bildung größerer funktioneller Einheiten – aus modularen Bausteinen entlang eines Energiegefälles von kleineren zu größeren Einheiten – in wässrigen Systemen „wie von selbst“.²³ Durch die Ausnutzung dieser natürlich ablaufenden Mechanismen können neue Material- und Eigenschaftskombinationen und somit erweiterte technische Anwendungsfelder für Funktionsmaterialien erschlossen werden. Allerdings beruhen diese Self-Assembly-Prozesse im Wesentlichen darauf, dass die Primärstruktur der Biomakromoleküle die sich bildende übermolekulare Struktur festlegt; diese ist also bereits „einprogrammiert“. Für hochpräzise Strukturen bleiben Biomakromoleküle und die Herstellung von Biopolymeren durch den Einsatz von Biotechnologie unübertroffen. Die gewünschten molekularen Bausteine oder „Rohstoffe“ können aber in den biotechnologischen Verfahren von Wirtsorganismen, wie Bakterien oder Hefezellen, im Fermenter hergestellt und danach zu Materialien prozessiert werden. Dabei ermöglicht die moderne Biotechnologie nicht nur die Synthese des Wildtyps, sondern auch den Zugang zu abgewandelten Strukturen, in einzelnen Fällen auch mit nicht natürlichen Grundbausteinen. Für die Materialwissenschaft besonders interessant sind unter anderem Proteine, da sie eine Vielfalt an biologischen Aufgaben übernehmen und beispielsweise hochfeste Fasern bilden können.²⁴ Eine sehr interessante Proteinfaser ist die Seide von Insekten und vor allem von Spinnen, die das Material in Kokons oder Netzen einsetzen. Dafür produzieren unter anderem Spinnen unterschiedliche Seidentypen mit spezifischen Funktionen, von denen die von der großen Ampullendrüse (Major Ampullate, MA) gebildete Seide des Abseilfadens außerordentliche mechanische Eigenschaften aufweist. Deren Zähigkeit – eine Kombination aus Zugfestigkeit und Dehnung – ist größer als die von technischen High-Performance-Materialien wie Kevlar oder Carbonfasern.²⁵

Weitere Technologiefelder

In der vorliegenden acatech DISKUSSION werden auch technische Anwendungen betrachtet, die oben nicht erwähnt sind, wie zum Beispiel neue Konzepte in der Robotik (weiche und elastische Aktuatoren, gekoppelte Systeme) und in der Füge- und Klebetechnik oder innovative Lösungsansätze bei der Erzeugung, Speicherung und Einsparung von Energie. Zu Letzteren zählen die Erforschung und Entwicklung der als

21 | Vgl. Speck et al. 2013.

22 | Vgl. Volkmer 1999.

23 | Vgl. Speck et al. 2012.

24 | Vgl. Römer/Scheibel 2007.

25 | Vgl. Grunwald et al. 2009.

„Grätzelzellen“ bekannten Farbstoff-Solarzellen oder der künstlichen Photosynthese. Obwohl entweder – wie im Falle der künstlichen Photosynthese – die Entwicklung noch am Anfang steht oder der Wirkungsgrad noch nicht konkurrenzfähig ist, wird bioinspirierten Materialien allgemein ein großes Potenzial zugeschrieben, einen wichtigen Beitrag bei der Entwicklung von nachhaltiger Technik zu leisten. Dieses „bionische Versprechen“ trifft jedoch nicht zwangsläufig und per se für bioinspirierte Innovationen zu.²⁶ Es gilt aber insbesondere dann, wenn sie ökonomisch sinnvolle, ökologisch schonende Alternativen zu erdölbasierten Systemen sowie klassischen Materialien und deren (oft energieintensiven) Herstellungsverfahren liefern können.



2 Chemische Synthese

Prof. Dr. Martin Möller

Leibniz-Institut für Interaktive Materialien, Aachen

Charakteristisch für Materialien der belebten Natur ist ihr komplexer Aufbau. So stellt auch hier die strukturelle und funktionale Verschiedenartigkeit der Natur die grundlegende Herausforderung für eine von der Biologie inspirierte Materialwissenschaft dar. Die strukturelle Vielfalt biologischer Materialien und der damit verbundene Informationsgehalt der Materialkonfigurationen weisen den Weg für den Übergang vom einheitlich zusammengesetzten Material zu funktionsbestimmten Systemen. Dabei beginnen wir gerade erst, von der Natur zu lernen, wie neue Eigenschaften über die Synthese komplexer Materialstrukturen ermöglicht werden können. Hier ist die Natur ein unübertroffenes Vorbild und stellt uns gleichzeitig vor die „synthetische“ Herausforderung, welche funktionalen Eigenschaften wir in die Struktur eines Materials einprogrammieren können.

Voraussetzung für zukünftige Entwicklungen ist somit eine schnelle Weiterentwicklung unserer Fähigkeiten für die Synthese immer komplexerer Strukturen. Dafür ist es notwendig, den Begriff der Synthese wesentlich weiter zu fassen, als darunter „nur“ die Herstellung der chemischen Bindungen und Moleküle zu verstehen. Zunehmend ist im Rahmen der Synthese auch zu berücksichtigen, dass Struktur und Eigenschaftsbildung über alle Längenskalen hinweg beherrscht werden müssen: Das beinhaltet die gesamte Kette vom Atom zum Molekül, vom Molekül zu nanoskopischen Bausteinen bis hin zu deren Verbindung auf der Mikrometerskala und zu den makroskopischen Strukturelementen des Bauteils. Heute unterscheidet man für den Weg vom Molekül zum Bauteil sehr klar einzelne Entwicklungsstufen, indem es für jede Längenskala Fachleute gibt, die ihre Methoden und ihr Spezialwissen in eigenen Disziplinen entwickeln, um sie dann über die Weitergabe ihrer Produkte miteinander zu verbinden. Im Gegensatz dazu verfügt die Natur mit ihren Wachstumsprozessen über eine vollständig integrierte Synthesetechnologie, die es erlaubt, aus vergleichsweise wenigen Grundbausteinen komplexe hierarchische Strukturen mit besonderen und aktiven Eigenschaften aufzubauen.

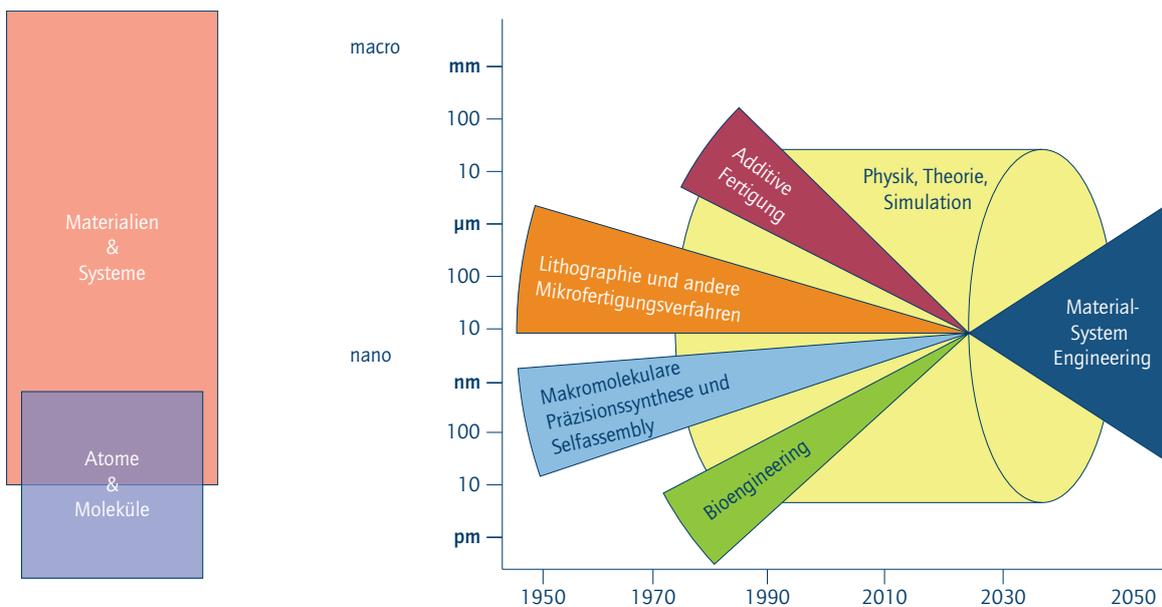


Abbildung 2: Treiber und interdisziplinäre Verknüpfungen für die Entwicklung komplexer molekularer Materialien. Neben der Beherrschung immer kleinerer Längenskalen in lithografischen und additiven Verfahren (top-down) wird der Fortschritt durch die zunehmende Fähigkeit zur Synthese und zur molekularen Simulation immer größerer Einheiten bestimmt (bottom-up) (Quelle: Martin Möller, Leibniz-Institut für Interaktive Materialien).

Daraus leitet sich die Entwicklung einer längenskalenübergreifenden Integration unserer Synthese- und Fertigungstechnologien ab – als eine grundlegende Herausforderung der „Biologisierung der Materialwissenschaften“. Solche längenskalenübergreifenden Synthesetechnologien sind die Voraussetzung, um die Struktur- und Funktionsbildung in Multikomponenten-Materialien zu bewältigen.

Aus der Komplexität und Vielfalt der Strukturen ergibt sich als ein weiterer Aspekt der „Biologisierung der Materialwissenschaften“ aber auch die Notwendigkeit, die jeweiligen „intelligenten“ Strukturen zu identifizieren, in deren Aufbau neue und hochentwickelte Funktionen kodiert sind.²⁷ Verbunden ist dies zunächst mit der Anforderung nach neuen, effizienten Selektionsmethoden. Zwar stehen uns auch hier zunehmend evolutionäre Selektionsprinzipien zur Verfügung, deren Zeitaufwand über High-Throughput-Methoden in Grenzen gehalten werden kann. Eine beschleunigte technische Entwicklung kann aber nur erfolgen, wenn die komplexen Interaktionen weitgehend verstanden werden. Um unser Verständnis weiter zu entwickeln, werden einerseits vielfältige Charakterisierungsmethoden benötigt, welche eine detaillierte und zeitaufgelöste strukturelle und morphologische Aufklärung solcher Strukturen erlauben. Andererseits können die vielfältigen Informationen zunehmend nur mit aufwendigen mathematischen Modellen und Simulationen interpretiert und verwertet werden. Für die Materialtechnologie und -verarbeitung gewinnt damit die zerstörungsfreie und hier insbesondere die Echtzeit-Charakterisierung zunehmend an Bedeutung – verbunden mit einer Echtzeit-Datenauswertung über den gesamten Herstellungsprozess sowie die Lebensdauer eines Produkts. Gleichzeitig können Synthese und Herstellung von immer komplexeren Materialstrukturen – unter Nutzung von spezifischen Wechselwirkungen – nur mithilfe neuer theoretischer Modelle und numerischer Simulationen erfolgreich sein, die es ermöglichen, alle Zusammenhänge auf verschiedenen Längen- und Zeitskalen zu erfassen.

Neben diesen drei bisher aufgeführten Aspekten einer „Biologisierung der Materialwissenschaften“, die als Herausforderung weit über die Verwendung biologischer Komponenten hinausgehen, ergibt sich weiterhin auch die Forderung nach einem Primat natürlicher Komponenten. Dieser vierte Aspekt folgt aus der dringenden Notwendigkeit neuer Synthese- und Nutzungstechnologien, die mit den natürlichen Kreisläufen verträglich sind beziehungsweise in diese integriert werden können. So erstrecken sich die Anforderungen an das Material von der

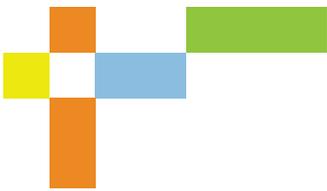
ausschließlichen Berücksichtigung der Verwendung zunehmend auch auf die ökologischen Konsequenzen, die mit der Herstellung und dem Einsatz der Materialien sowie mit den dabei angewandten Technologien verbunden sind. Dies betrifft die Verfügbarkeit, den Energieeinsatz und eine zukunftsfähige Balance zwischen technologischem Nutzen und dem Einfluss auf die Funktion der natürlichen Kreisläufe. Daraus folgen zusätzliche Herausforderungen für eine neue Materialtechnologie, die um natürliche Konzepte und Bausteine erweitert ist. Eine besondere Chance liegt hier in der Nutzung komplexerer natürlicher Bausteine, Materialien und Prozesse sowie der darin bereits vorgegebenen supramolekularen Strukturen (siehe das Beispiel der Nanozellulose in Kapitel 6.3).

Um sich von erdölbasierten Grundstoffen weitgehend lösen zu können und die Umweltbelastung zu reduzieren, ist eine Neuausrichtung auf Stoffströme erforderlich, die entweder auf der Verwertung sehr heterogen zusammengesetzter Biomasse oder auf einer erst in Ansätzen entwickelten Power-to-X-Technologie beruht.²⁸ Gleichzeitig ergeben sich neue Anforderungen an die Bioverträglichkeit sowie die Bioresorbierbarkeit und die stoffliche Verwertbarkeit im Sinne einer effizienten Kreislaufwirtschaft. In Konkurrenz zu den etablierten, sehr leistungsfähigen Polymeren ergibt sich so ein Interesse an neuen Monomeren und Polymeren. Beispiele sind Furandicarbonsäure, 1,3-Propandiol, aber auch CO₂ und CO für biobasierte und bioresorbierbare Polyester. In Bezug auf bereits etablierte biobasierte und bioabbaubare Produkte wie Polyhydroxyalkansäuren (PHAs) und Polymilchsäure besteht nach wie vor ein Bedarf, deren Eigenschaftsspektrum nachdrücklich weiterzuentwickeln. Ein weiterer Aspekt: Viele unterschiedliche Rohstoffe stammen aus tropischen Anbaugebieten. Aufgrund der vielfältigen Auswirkungen der Monokulturen auf die Lebensgemeinschaften und Lebensverhältnisse vor Ort ergibt sich das Bedürfnis, diese Rohstoffe nicht mehr überwiegend durch Plantagenwirtschaft zu gewinnen, sondern mehr und mehr in biologischen und chemischen Syntheseanlagen herzustellen.

Weitere Anforderungen betreffen wasserbasierte, nicht-toxische chemische Prozesse sowie die Beherrschung physikalischer Umwandlungen und Self-Assembly-Prozesse. Etablierte Beispiele sind wasserbasierte Lacke und Beschichtungen, Klebstoffe und Anwendungen im Bau- sowie im Kosmetikbereich. Die Alterung und das Versagensverhalten in den Griff zu bekommen, ist eine grundsätzliche Herausforderung für eine ressourcenschonende Technologie. Neue und weiterführende Antworten für die Stabilisierung, die Vorhersagbarkeit, die Selbstheilung und die

27 | Vielfach wird der Begriff „Intelligente Materialien“ für adaptive Materialien genutzt. Solche smarten oder adaptiven Eigenschaften beruhen oftmals auf komplexen Variationen von Materialstrukturen.

28 | Vgl. Power to X Allianz 2019.



kontrollierte Alterung sind nur im engen Zusammenspiel zwischen Makromolekularer Chemie, Polymertechnologie, Polymerphysik und mathematischer Simulation zu erwarten. Gerade die Entwicklungen im Bereich des Hochleistungscomputing werden hier neue Wege eröffnen, *in silico* Vorhersagen zu treffen.

Wenn für die „Biologisierung der Materialwissenschaften“ die vier oben aufgeführten Kriterien zusammengefasst werden – (i) skalenübergreifende Synthesetechnologien als Voraussetzung für einen (ii) hohen Informationsgehalt der Materialstruktur und eine erweiterte Funktionalität, (iii) die Möglichkeit zur Selektion intelligenter Strukturen, die die „richtigen“ Eigenschaften aufweisen, und (iv) die Nutzung komplexer natürlicher Bausteine, Materialien und Prozesse –, dann wird auch deutlich, dass wir heute „on a tipping point in science and engineering“, das heißt am Anfang einer herausfordernden neuen Entwicklung, stehen, die Elemente eines Paradigmenwechsels enthält.²⁹

Am Beispiel molekularer Materialien adressiert Abbildung 2 die technologischen und wissenschaftlichen Voraussetzungen, mit denen diese Herausforderungen in Zukunft erfolgreich bearbeitet werden können, um so die „Biologisierung der Materialwissenschaften“ als ein aufstrebendes Forschungsfeld zu großer praktischer Bedeutung zu bringen.

Fortschritte in der chemischen Synthese immer größerer und auch sehr einheitlicher Moleküle haben den Weg bereitet, vielfältige und definierte Überstrukturen über Self-Assembly-Prozesse³⁰ darzustellen. Beispiele sind künstliche Vesikel, supramolekulare Gele und das dimensionsbegrenzte Wachstum anorganischer Festkörper (siehe auch Kapitel 2.1). Gleichzeitig steht heute eine Vielzahl schaltbarer Funktionsmoleküle zur Verfügung, einschließlich der ersten molekularen Motoren, wie sie von Ben Feringa (Nobelpreis 2016) synthetisiert wurden. Ein besonders beeindruckendes Beispiel, wie man durch Nutzung von Self-Assembly-Prozessen, das heißt über ein Aufbauverfahren, Bausteine und ganze Funktionselemente auf der Nanometerskala konstruieren kann, sind die von Hendrik Dietz beschriebenen molekularen Maschinen aus DNA-Molekülen (siehe Kapitel 2.2). Erweitert wird dieser Werkzeugkasten durch die ersten synthetischen Beispiele für eine dissipative Strukturbildung (Dynamic Self-Assembly), also definierte Strukturen, deren Bildung von einer stetigen Energiezufuhr abhängt und

die zerfallen, wenn die zu ihrer Erzeugung notwendige Energiezufuhr unterbrochen wird.³¹

Aus der stürmischen Entwicklung der Lebenswissenschaften ergibt sich nicht nur ein tiefgreifendes molekulares Verständnis der biologischen Vorgänge, sondern es konnte sich auch eine synthetische Biologie entwickeln. Anders als das ureigene Ziel der Lebenswissenschaften, zum Verständnis der biologischen Vorgänge beizutragen, richtet sich die synthetische Biologie zunehmend auch darauf biologische Mechanismen für neue Synthesysteme und neue Produkte einzusetzen. Hier ergänzen sich die synthetischen Ansätze der Materialwissenschaften mit denen der Biologie. So kann die chemische Synthese zwar zunehmend komplexere und funktionalere Moleküle bereitstellen, erreicht aber noch lange nicht die Fähigkeiten der Natur für die Synthese funktionaler Biomakromoleküle. In der Natur ergeben sich deren Überstrukturen, Komplexbildung und Schaltbarkeit zwischen unterschiedlichen Zuständen in hochpräziser Weise aus der Information, die in der Primärstruktur der Moleküle kodiert vorliegt. Für neue Materialsysteme und Hybridkonstrukte, in denen künstliche Funktionsbausteine mit biologischen Komponenten verbunden werden, können wir über die Biotechnologie nicht nur auf Moleküle in Form des Wildtyps, sondern auch auf gezielte Abwandlungen und Neusynthesen zurückgreifen. Beispiele für diese Entwicklungen sind die 2018 mit dem Chemienobelpreis ausgezeichneten Methoden des Phage-Displays und der Directed Evolution sowie auch die über PCR-Synthese möglichen DNA-Origami-Ansätze, wie sie oben bereits im Zusammenhang mit dem Beitrag von Hendrik Dietz angesprochen wurden.

Durch die Möglichkeiten der Hybridisierung von künstlichen und natürlichen Bausteinen ergeben sich neue Herausforderungen für die Chemie. Auf Ebene der kleinsten Bausteine gibt es naturähnliche, aber abgewandelte Moleküle, die in biologischen Synthesemechanismen aufgenommen werden können. Als ein Beispiel führt der Beitrag von Birgit Wiltschi die nicht-kanonischen Aminosäuren auf, die in der Biosynthese als Proteinbausteine aufgenommen werden können (siehe Kapitel 2.3).

Das große Potenzial, das sich für die Synthese neuer Materialien unter Nutzung der modernen Biotechnologie ergibt, wird in dem Interview mit Lin Römer aufgezeigt (siehe Kapitel 2.6). Seine

29 | Zur Gründung des Wyss Institute in Harvard 2009 wurde das so formuliert: „... we are now at a tipping point in the history of science and engineering – we are beginning to understand enough about how Nature builds, controls and manufactures that entirely new engineering principles are already beginning to be discovered.“

30 | Im Deutschen wird der Begriff Selbstorganisation häufig undifferenziert verwendet. Im Englischen ist die Unterscheidung von Self-Assembly als Ergebnis einer thermodynamischen Gleichgewichtsbildung und Selbstorganisation als eine energiedissipative Strukturbildung in Nicht-Gleichgewichtsprozessen eindeutiger.

31 | Vgl. Timonen et al. 2013.

Firma AMSilk nutzt die Synthesetechnologie der Natur, um neue Spinnenseiden mit maßgeschneiderten Eigenschaften für ganz unterschiedliche Einsatzbereiche in der Kosmetik und für Hochleistungsfasern herzustellen, die sich über die benötigten Rohstoffe bis hin zur Regeneration vollständig in die Kreisläufe der Natur integrieren (siehe Kapitel 2.6).

Hybridisierung ist ein Konzept, das sich nicht nur auf die molekularen Bausteine beschränkt, sondern auch – durch die Kombination von größeren mikroskopischen Bauelementen – für Materialien mit neuen, bisher unerreichten Eigenschaftsprofilen geeignet ist. Markus Antonietti führt dies in seinem Beitrag am Beispiel von Muschelschalen und deren perfekt geschichteter Plättchenstrukturen auf (siehe Kapitel 2.4): Dort ermöglicht die „gemauerte“ Konstruktion in ihrer Kombination Festigkeiten und Zähigkeiten, die das Grundmaterial alleine nicht erreicht. Der Beitrag von Helmut Cölfen zeigt dann in beeindruckender Weise, wie dieses Prinzip auf ein Material wie Zement übertragen werden kann, um diesem bis dahin für unmöglich gehaltene elastische Eigenschaften zu verleihen (siehe Kapitel 2.5).

Auf der Längenskala größer als einige wenige Mikrometer, stellt die Verbindung von metallischen und keramischen Bausteinen einerseits und mit organischen Materialien andererseits immer eine besondere Herausforderung dar. Heute ist die Fertigung der anorganischen und der organischen Materialien weitgehend durch die großen Unterschiede der Verarbeitungs- und Zersetzungstemperaturen voneinander abgegrenzt, und die Integration solcher Komponenten steht erst am Anfang. Es gibt auch keine allgemeingültige Lösung zur Bewältigung dieser Aufgabe. Gleichzeitig gibt es bereits viele technologisch hochrelevante Beispiele, etwa die galvanische Abscheidung von Metallschichten, die Verwendung von Precursorverbindungen, aus denen das Metall in der Gasphase generiert werden kann, Sputterverfahren, laserbasierte additive Fertigungsverfahren, bei denen nur sehr kleine Volumina lokal erhitzt werden, und auch die Verwendung von amorphen Metallen, die unter Druck oder mit Ultraschall verschweißt werden können.

Diese Punkte weisen auch noch einmal darauf hin, dass unterschiedliche disziplinäre Entwicklungen in Zukunft vermehrt zusammengeführt werden müssen. Das betrifft nicht nur Ansätze, bei denen die chemische Synthese zunehmend Gebrauch von Bausteinen der Biotechnologie macht oder neue

Bausteine und Reaktionen für die Lithografie und die additiven Fertigungsverfahren bereitstellt, sondern es wird auch verlangt, dass die jeweiligen Verfahren miteinander kombiniert werden können. Ein noch weitgehend unbearbeitetes Beispiel ist die Kombination von additiven Fertigungsverfahren mit einem Self-Assembly-Prozess, beispielsweise um ein hochfestes Material herzustellen, das in seiner Struktur an die Belastungsrichtungen angepasst ist.³² Gegenüber den etablierten Disperionsystemen wie High-Impact-Polystyrol oder Ruß- und Silica-verstärkten Elastomeren zeigen Vorbilder aus der Natur, wie der bereits erwähnte Muschelperlmutter,³³ Holz- oder Knochenstrukturen, ein großes Entwicklungspotenzial für konstruierte und anisotrope Hybridstrukturen. Einfachere Beispiele sind schon längst großtechnisch etabliert, etwa die Abscheidung eines Metalliclacks, wobei sich die Aluminiumplättchen parallel zur Oberfläche ausrichten, um so den erwünschten Glitzer-effekt zu erzeugen.³⁴

Die Möglichkeit, Nanokomposite mit wohldefinierter Überstruktur herzustellen, ebnet auch den Weg zu neuen Materialien mit besonderen elektronischen, optischen und mechanischen Eigenschaften. Ein Beispiel sind die Heterostrukturen (Bulk Hetero Junctions, BHJ) für organische photovoltaische Zellen (OPV).³⁵ Solche sehr kleinen Strukturen bis hinab zu den molekularen Abmessungen können zunehmend auch mit lithografischen Methoden erzeugt werden. Ein Beispiel dafür, dass die Top-down-Verfahren längst auch für 3D-Strukturen die Grenze zu den molekularen Dimensionen erreicht haben, sind Multiphotonen-Lithografie-Verfahren. Hiermit wird deutlich, dass die sich schnell entwickelnden additiven Fertigungsverfahren in den Bereich der molekularen Dimensionen vorstoßen.³⁶ Andere Beispiele für additive Verfahren, die an die chemische Synthese anschließen, sind die Layer-by-Layer-Verfahren, die zunächst für die schichtweise Abscheidung von Polyelektrolyten entwickelt wurden und inzwischen längst auch für andere Aufbaureaktionen angewendet werden. Ein Beispiel ist die „Atomic Layer Deposition“ für die Erzeugung von Nanoschichten in der Mikrosystemtechnik.

Komplexe, hochfunktionale Hybridstrukturen ergeben sich weiterhin aus der Integration biologischer Prozesse und synthetischer Strukturen. Ein Beispiel sind Hydrogele, die als synthetisches Gerüst für den Aufbau von lebendem Gewebe dienen. Ein besonderes, grenzüberschreitendes Zukunftsgebiet öffnet sich

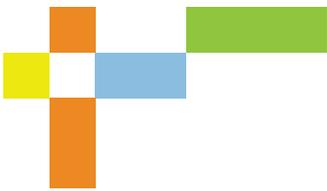
32 | Vgl. Gantenbein et al. 2018.

33 | Vgl. Wegst et al. 2015.

34 | Vgl. Wißling 2006.

35 | Vgl. Dennler et al. 2009.

36 | Vgl. El-Tamer et al. 2017.



hier im Bereich der personalisierten Gesundheitstechnik mit dem Forschungsfeld der biomedizinischen Hybridsysteme und der Entwicklung „neuartiger Therapien“ (ATMPs).³⁷ Hier werden beispielsweise synthetische Gerüststrukturen mit lebenden Zellen oder Vektoren mit Gentherapieutika ausgestattet.

Insbesondere für solche biohybriden Entwicklungen kann dem Begriff der „Biologisierung der Materialwissenschaften“ ein weiteres besonderes Merkmal zugeordnet werden: Es eröffnen sich neue Eigenschaften, die sich nicht mehr in direkter Weise aus der Kenntnis der Untereinheiten ableiten lassen. Hier wird sich die Materialsynthese selbst dem Übergang zur belebten Materie annähern. Das damit verbundene emergente Verhalten ist an eine Reihe von Voraussetzungen geknüpft, wie sie weiter oben bereits angesprochen wurden und bezüglich derer die Literatur in den letzten Jahren eine beeindruckende Entwicklung zeigt:³⁸ (i) Fähigkeiten, über ein gleichgewichtsgetriebenes Self-Assembly von Molekülen und fortgeschrittenen Lithografie-Methoden skalenübergreifend Strukturen „bauen“ zu können, (ii) die zunehmende Verfügbarkeit molekularer Schalter, (iii) die Beherrschung von bistabilen Strukturen und Hysterese-Effekten, (iv) die kontrollierte Energieaufnahme und damit ermöglichte dissipative Strukturbildungsprozesse sowie (v) die Integration aktiver Rückkopplungsmechanismen (Feedback). Auch diese letzte Überlegung ist in Abbildung 2 enthalten, indem die Konvergenz der verschiedenen disziplinären Entwicklungen auf die Bildung völlig neuer aktiver Materialsysteme ausgerichtet ist.

Wenn sich Abbildung 2 auf molekulare Materialien konzentriert, so hat das den Hintergrund, dass die Vielfalt der Molekülstrukturen auch eine große Vielfalt an Materialstrukturen ermöglicht und die Natur wohl genau aus diesem Grund die lebende Materie mit organischen Molekülen entwickelt hat. Das bedeutet aber nicht, dass die intelligente Struktur der biologischen Materie keine Herausforderung für die Weiterentwicklung von Metallen und anderen anorganischen Materialien darstellt. Wird Biologisierung als Herausforderung zur Synthese immer komplexerer hierarchischer Strukturen und zur Beherrschung der sich ergebenden Funktionen definiert, dann erweitert sich gerade für diese Materialien die Synthese von der chemischen Verknüpfung zur Strukturbildung bei der Verarbeitung. So ist für Metalle und Keramiken die eigenschaftsbestimmende Verknüpfung von chemischer Zusammensetzung und Verarbeitung über die große Bedeutung der Gefügestrukturen etabliert. Spannungszustände und innere Grenzflächen bestimmen nicht nur die Funktionseigenschaften, sondern auch die Alterung und das Versagensverhalten.

Dieser Punkt führt auch zu der Frage nach den Grenzen, die sich für die Entwicklung des in Abbildung 2 dargestellten Schemas oder der dahinterliegenden Roadmap ergeben. Abbildung 2 erfasst nur die Strukturbildung auf kleinen Längenskalen. Für die Fertigung von komplexen Materialstrukturen auf der Längenskala größer als im Mikrometerbereich fehlen uns vielfach die Fertigungsverfahren. Die Natur lässt wachsen, in den meisten Fällen Schicht für Schicht. Diese Wachstumsprozesse sind langsam und häufig mit chemischen Veränderungen wie Verholzung, Verhornung und Kalzifizierung verbunden und sie sind adaptiv. Technische Fertigungsverfahren müssen schnell und effizient zum Bauteil oder Produkt führen. Hier ergibt sich für die zukünftige Weiterentwicklung eine große Bedeutung der additiven und der daraus abgeleiteten adaptiven Fertigungsverfahren.

Eine adaptive Struktur- und Funktionsbildung wird dort möglich, wo die Synthese und Fertigung mit der Anwendung zusammenfallen, also in der Anwendung erfolgt. Über die damit gegebenen Möglichkeiten zur Optimierung der Strukturen zeichnet sich ein neuer Bedarf nach solchen Produkten ab, zum Beispiel für biohybride Implantate, wenn eine Gerüststruktur mit lebenden Zellen besiedelt wird, die dort neues Gewebe oder sogar ein Organ ausbilden sollen. Ein weiteres Anforderungsfeld für adaptive Eigenschaften ergibt sich aus dem zunehmenden Bedarf nach Materialien und Produkten, die sich in den natürlichen Kreislauf integrieren, die also wissen, wann sie welche Funktion erfüllen müssen. Beispielsweise könnten Materialien ihren Lebenszyklus zunächst als festes Strukturmaterial starten, dann leicht in Komponenten zerlegbar sein, die für eine andere Verwendung neu zusammengesetzt werden, um schließlich nach einem Zersetzungsprozess als Rohstoff oder Dünger für den nächsten Kreislaufzyklus zur Verfügung zu stehen.

2.1 Die Herausforderung, lebensähnliche Materialien herzustellen³⁹

Prof. Dr. E. W. Meijer

Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Niederlande

Die Natur erhält das Leben aufrecht, indem sie hochselektive, spezifische, effiziente, aber komplexe molekulare Anordnungen und Netzwerke dynamisch steuert. Inspiriert von diesen Systemen, ist es Chemikerinnen und Chemikern in den letzten 150 Jahren

37 | Vgl. Paul-Ehrlich-Institut 2006.

38 | Vgl. Merindol/Walther 2017.

39 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

gelingen, eine breite Palette hoch entwickelter Moleküle mittels kovalenter Synthese zu synthetisieren. Solche Moleküle bilden die Grundlage für viele lebensverbessernde Technologien. Noch höher entwickelte synthetische Bausteine können aus mehreren oder vielen Molekülen durch intermolekulare, nicht-kovalente Wechselwirkungen gebildet werden. Mit solchen hochdefinierten Überstrukturen als Resultat einer in das kovalente Gerüst der Moleküle einprogrammierten gegenseitigen Erkennung befasst sich die supramolekulare Chemie.

Als Herausforderung für neue Materialien und Systeme ermöglichen supramolekulare Verknüpfungen hierarchische Konstruktionen aus mehreren Komponenten. Die besondere Anforderung hierbei ist es, die Balance zwischen den komplementären Prinzipien der molekularen Erkennung zu kontrollieren, das heißt, unterschiedliche Wechselwirkungen und Geometrien zum Verbinden der verschiedenen molekularen Einheiten zu beherrschen. Zwar wurden bereits große und bedeutende Schritte unternommen, um Selbstorganisation, Selbstassemblierung und Selbsterkennung zu verstehen. Das Wort „Selbst“ zeigt aber bereits die Grenzen unserer Methoden zum Aufbau von Mehrkomponentensystemen. Die Assemblierung von verschiedenen Molekülen beruht bisher in erster Linie auf Serendipität, also einer zufälligen Beobachtung und Entdeckung eines komplexen Zusammenfüggungsschritts und nicht auf reproduzierbaren Verfahren und Vorhersageregeln. Eine solche Strategie kann uns in unserem Bestreben nicht wirklich voranbringen, komplexere und „lebensähnliche“ molekulare Materialien herzustellen, um

neuartige Funktionen zu schaffen. Die stochastische Erkundung aller möglichen Struktur- und Energiekombinationen des betrachteten Systems muss durch eine systematische Vorgehensweise ersetzt werden. So erfordern die Assemblierungsprozesse äußerst strenge Verfahrensprotokolle, um zu gewährleisten, dass die nicht-kovalente Synthese reproduzierbar ist und in verschiedenen Laboratorien funktioniert.

In der Konsequenz müssen wir einen Paradigmenwechsel in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik anstreben, der die erfolgreichen Konzepte der kovalenten Synthese in den Bereich der nicht-kovalenten Synthese überträgt. Der Aufbau von Mehrkomponentensystemen sollte in einem mehrstufigen Prozess erfolgen, der nicht nur von den Informationen bestimmt wird, die im kovalenten Gerüst der Komponenten gespeichert sind, sondern auch von Kinetik und Thermodynamik der gewählten einzelnen Schritte gesteuert wird. Diese Vision des Aufbaus funktionaler molekularer Materialien, der nach den Prinzipien der Natur auf Protokollen mit mehreren aneinandergereihten nicht-kovalenten Schritten beruht, steht noch am Anfang und wird uns auch eine Vorstellung davon geben, wie das „Leben“ aus einer Ansammlung von „toten“ Molekülen entstehen konnte. Zu den wichtigen zukünftigen Anwendungsbereichen für solche neuen Materialien zählen das Tissue Engineering, die Arzneimittelabgabe, adaptive Materialien für die weiche Robotik und molekulare Information. Am relevantesten könnte allerdings die Entwicklung leichter, biokompatibler Materialien sein, die zu einer nachhaltigeren Gesellschaft ohne Kunststoffabfälle beitragen könnten.

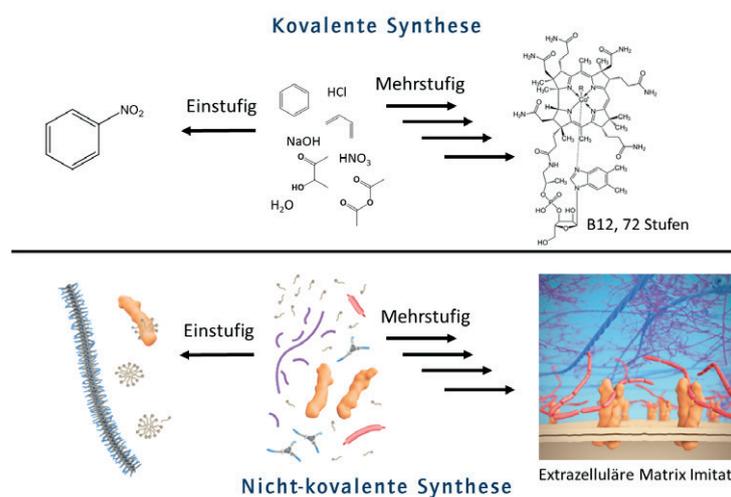


Abbildung 3: Die mehrstufige nicht-kovalente Synthese zur Herstellung biologisch inspirierter, lebensähnlicher Materialien als ein Paradigmenwechsel nach dem Vorbild der Entwicklungen in der kovalenten Synthese der letzten 150 Jahre⁴⁰ (Quelle: E. W. Meijer, Eindhoven University of Technology)



2.2 Konstruieren mit DNA

Prof. Dr. Hendrik Dietz

Lehrstuhl für Biomolekulare Nanotechnologie, Technische Universität München, Garching bei München

Künstliche molekulare Strukturen mit Tausenden von Atomen an kontrollierten Koordinaten aufzubauen, stellt eine derzeit noch unüberwindbare Herausforderung für die traditionellen Methoden der chemischen Synthese dar. Die Natur bietet jedoch einen Weg, um diese Herausforderung zu meistern. Sie verwendet Biopolymere aus Aminosäure- und Nukleinsäureketten, die jeweils ein definiertes Alphabet chemischer Bausteine enthalten. Die Strukturen natürlicher molekularer Maschinen werden in den Sequenzen der chemischen Bausteine kodiert, und die Strukturen bilden sich durch Selbstassemblierung. Ein möglicher Weg, komplexe künstliche molekulare Strukturen mit neuen, durch die Konstrukteurin beziehungsweise den Konstrukteur bestimmten Funktionen zu schaffen, besteht darin, sowohl die Materialien als auch die Prinzipien zu übernehmen, die von der Natur zum Aufbau synthetischer molekularer Strukturen verwendet werden. Dies ist die Strategie, die von biomolekularen Designerinnen und Designern in den Bereichen des De-novo-Proteindesigns, der RNA-Nanotechnologie und der DNA-Nanotechnologie verfolgt wird. Diese Ansätze sind allesamt von der Idee getrieben, Strukturen in Sequenzen zu kodieren.

Warum sollte man den Bau von molekularen Strukturen oder Maschinen speziell aus DNA überhaupt in Betracht ziehen, angesichts des Umstands, dass DNA eine eher passive Rolle als Informationsträger in der Natur einnimmt? DNA hat physikalische und chemische Eigenschaften, die diese Molekülgattung auch für die Konstruktion von Strukturen attraktiv machen. Benutzerdefinierte DNA-Sequenzen sind über die chemische Festphasensynthese, die Gensynthese sowie biotechnologische Methoden leicht verfügbar. DNA-Moleküle zeigen ferner im Vergleich zu RNA und Proteinen eine bemerkenswerte chemische Stabilität. DNA-Einzelstränge sind flexible Polymere, während doppelhelikale DNA-Domänen vergleichsweise starr sind, mit Persistenzlängen im Bereich von etwa fünfzig Nanometern. Durch die Kombination von flexiblen mit starren Elementen kann daher ein breiter Bereich lokaler Steifigkeit erzielt werden. Die Thermodynamik der Bildung doppelhelikaler DNA-Domänen ist gut ergründet, und ihre Stabilität kann sequenzabhängig relativ genau vorhergesagt werden. Dies gilt auch für die Neigung von DNA-Einzelsträngen zur Bildung von Sekundärstrukturen. Die Watson-Crick-Basenpaarung zwischen DNA-Strängen mit komplementären Sequenzen

bietet eine starke und gut kontrollierbare physikalische Wechselwirkung, mit der Sekundärstrukturen planbar werden, die wiederum hierarchisch in Tertiär- und Quartärstrukturen angeordnet werden können. Die begrenzte chemische Vielfalt natürlich vorkommender DNA könnte potenziell den Umfang der Funktionalitäten einschränken, die mit Objekten erreicht werden können, welche aus kanonischen DNA-Basen aufgebaut sind. Glücklicherweise gibt es aber auch eine Fülle chemischer Modifikationen und nicht-kanonischer Basen, die ortsselektiv in DNA-Objekten eingebracht werden können, um die chemische Vielfalt, wo erforderlich, wesentlich zu erweitern. Darüber hinaus können DNA-Moleküle selbst mit der chemischen Standardzusammensetzung auch katalytisch aktiv sein (sogenannte DNAzyme). DNA hat damit letztlich die Qualität eines ungewöhnlichen und vielseitigen Werkstoffs erreicht. Diese Eigenschaften werden bereits praktisch genutzt: Es existiert eine Reihe von Anwendungen, in denen speziell geformte DNA-basierte Trägerstrukturen zur Beförderung von plasmonischen oder photonischen Effekten oder als flüssigkristalline Matrix herangezogen wurden. Ferner wird derzeit eine Reihe von Strukturen in Modellstudien untersucht, um das Potenzial von DNA-Trägerstrukturen für Anwendungen als Wirkstofftransporter oder für andere Zwecke in Diagnostik und Therapie zu ergründen.

Die Konstruktion autonom laufender molekularer Maschinen zählt zu den Kernzielen biomolekularer Designerinnen und Designer. Maschinen zeichnen sich typischerweise durch einen gerichteten Prozess aus, der über eine Motoreinheit gegen äußere Kräfte angetrieben wird. Mithilfe der DNA-Nanotechnologie könnten möglicherweise solche Motoren und auch die daran gekoppelten Maschinen hergestellt werden. Für die Motoreinheiten müssen Mechanismen konstruiert werden, die genau definierte Dreh- oder Translationsfreiheitsgrade aufweisen und ferner strukturelle Merkmale haben, die zu asymmetrischen periodischen Energielandschaften führen. Durch Anwendung verschiedener Arten deterministischer oder stochastischer thermischer, chemischer oder mechanischer Störungen könnten die Systeme dann aus dem thermischen Gleichgewicht hin zur gerichteten Brownschen Bewegung gebracht werden. Damit wären Motoren realisiert. Verschiedene Varianten solcher Mechanismen werden international derzeit untersucht.⁴¹ Die Realisierung effizienter künstlicher molekularer Motoren wäre ein enormer Fortschritt. Solche Motoren könnten beispielsweise dazu beitragen, Transportphänomene fern vom Gleichgewicht zu untersuchen. Sowohl der Prozess der Konstruktion solcher funktionellen Motoreinheiten als auch die daraus resultierenden Einheiten könnten dazu beitragen, Konstruktionsprinzipien aufzudecken,

41 | Vgl. Ketterer et al. 2016.

die der Funktion natürlicher makromolekularer Maschinen zu Grunde liegen. Künstliche molekulare Motoren könnten außerdem helfen, zu klären, wie klassische mechanische Bewegungen eigentlich an quantenmechanische chemische Reaktionen gekoppelt werden können. Robust funktionierende künstliche Motoren werden schließlich auch von großem praktischem Nutzen sein. Sofern sie ausreichend modular und integrierbar sind, könnten sie eine Reihe von Prozessen antreiben, in denen Arbeit verrichtet werden muss, beispielsweise zum Pumpen und Trennen von Molekülen über Barrieren, zum Verpacken von Molekülen, bei der

enzymatischen chemischen Synthese und beim aktiven Antreiben von Wirkstofftransportern.

Aus diesem Grund ist es interessant, Antworten auf diese Fragen zu finden und die Rolle zu erfahren, die DNA bei der Bereitstellung der entsprechenden technischen Lösungen spielen wird. Bisher hat sich DNA als äußerst vielseitiger Werkstoff für die Herstellung immer komplexer werdender Strukturen erwiesen, die wiederum die Grundlage für den Bau der betreffenden Maschinen bilden könnten.

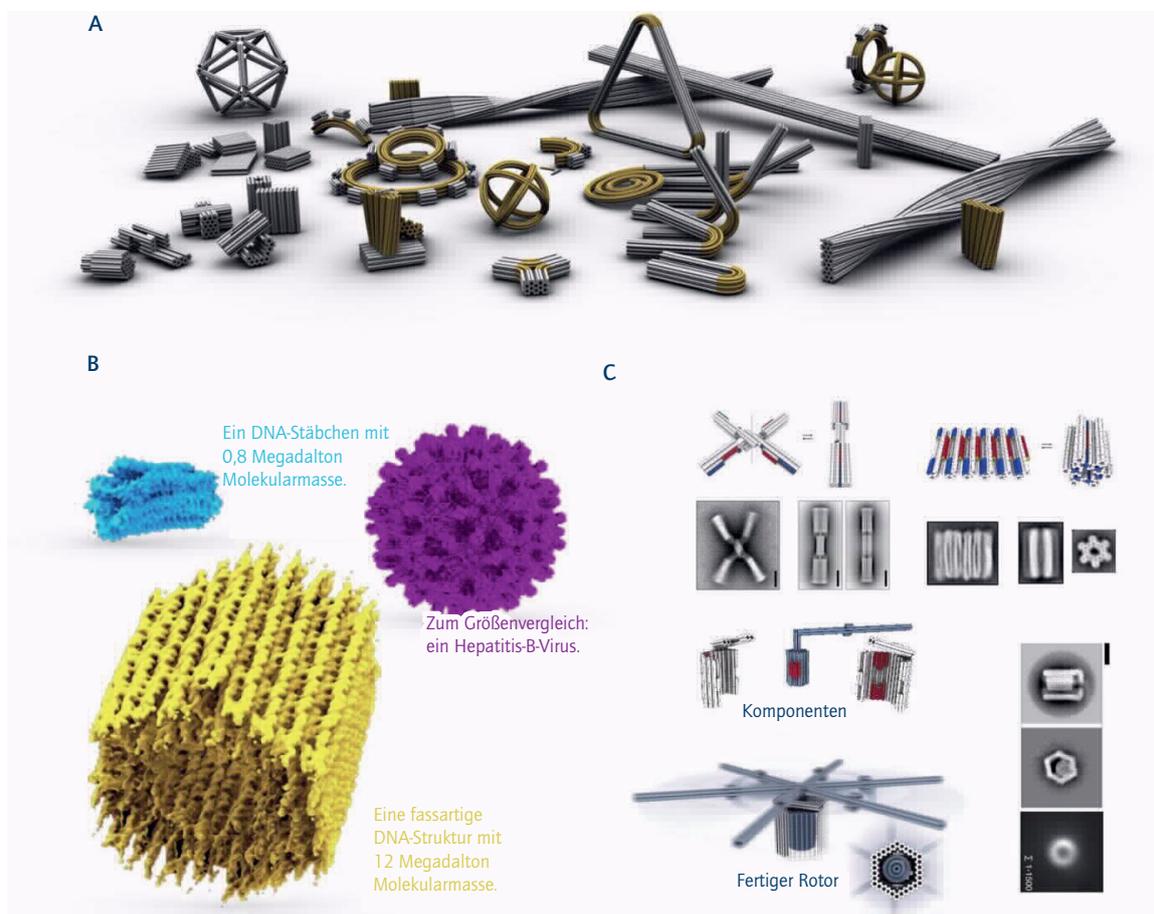


Abbildung 4: A: Formenspektrum von planbaren DNA-basierten molekularen Strukturen – teilweise bereits kommerziell verfügbar.⁴² Das Bild zeigt ein dreidimensionales Modell von DNA-basierten molekularen Strukturen. Zylinder stellen einzelne DNA-Doppelhelices dar. Gelb gefärbte Regionen sind gezielt gekrümmte oder verdrillte Bereiche. Konstrukteurinnen und Konstrukteure nutzen solche Darstellungen typischerweise in der Entwurfsphase. B: Die strukturelle Validierung ist ein wichtiger Teil der praktischen Umsetzung. Gezeigt sind exemplarisch zwei Elektronendichten von DNA-Nanostrukturen (gelb, blau) und zum Größenvergleich eine Elektronendichte eines Hepatitis-B-Virus. Alle Aufnahmen wurden mithilfe der Kryotransmissionselektronenmikroskopie (TEM) gemacht (unveröffentlicht). C: Exemplarische Darstellung von DNA-Nanostrukturen mit internen Freiheitsgraden zur Realisierung von Schaltern und Rotor-Modulen, jeweils mit TEM-Bildern. Unten rechts gezeigt ist eine Fluoreszenzspur, die die Rotation eines Rotorpartikels direkt nachweist (Quelle: Hendrik Dietz, Technische Universität München).



2.3 Nicht-kanonische Aminosäuren

Dr. Birgit Wiltschi

ACIB – Austrian Centre of Industrial Biotechnology, Graz, Österreich

Proteine vermitteln in allen lebenden Organismen, von Mikroorganismen über Pflanzen und Tiere bis hin zum Menschen, außerordentlich vielfältige Eigenschaften. Sie geben dem Haar Stabilität, machen Spinnenseide elastisch, wandeln in Form von Enzymen Zucker in Alkohol um oder schützen uns als Antikörper vor Krankheiten. Um diese diversen funktionellen Eigenschaften zu generieren, fügt die Natur Aminosäuren als kleine Proteinbausteine zu Ketten unterschiedlicher Zusammensetzung und Länge zusammen. Erstaunlicherweise reicht ein Satz von lediglich zwanzig sogenannten kanonischen Aminosäuren aus, um die Proteine für die gesamte biologische Vielfalt zu biosynthetisieren.

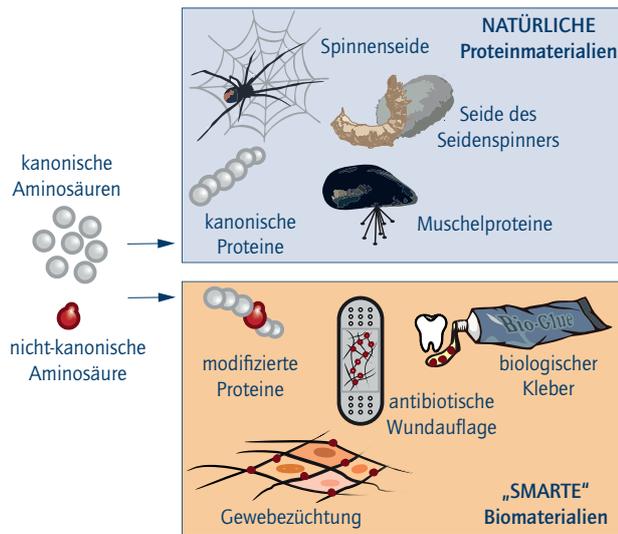


Abbildung 5: Nicht-kanonische Aminosäuren verwandeln natürliche Proteinmaterialien in smarte Biomaterialien. Natürliche Proteinmaterialien wie Spinnenseide, die Seide des Seidenspinners oder Muschelseide bestehen aus kanonischen Aminosäuren. Über den Einbau von nicht-kanonischen Aminosäuren können neue Funktionalitäten in diese Materialien eingebracht werden. Die modifizierten Proteine bilden die Grundlage für smarte Biomaterialien mit vielversprechenden Anwendungen in der Zukunft (Quelle: Birgit Wiltschi, Austrian Centre of Industrial Biotechnology).

Für moderne Medikamente, Diagnostika und Biomaterialien nutzt die Industrie zunehmend chemisch modifizierte Proteine, die für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert sind. Die aktuellen Methoden für die chemische Modifikation von Proteinen sind allerdings entweder nicht selektiv oder können nicht an jeder beliebigen Position im Protein angewandt werden. Eine Lösung dieses Problems liegt darin, nicht-kanonische Aminosäuren mit einzigartigen chemischen Eigenschaften ortsselektiv einzubringen. Wie der Name bereits andeutet, sind nicht-kanonische Aminosäuren von Natur aus nicht für die Proteinbiosynthese vorgesehen. Ein rekombinanter Wirtsorganismus für die Proteinproduktion kann jedoch mit der Fähigkeit ausgestattet werden, die nicht-kanonische Aminosäure – und damit die gewünschte Eigenschaft – selektiv an einer ganz bestimmten Position im Zielprotein einzubauen.

Diese Technik ermöglicht die präzise Kontrolle von Proteinmodifikationen. Sie wurde erfolgreich angewandt, um Proteinmaterialien wie zum Beispiel Seide gezielt chemisch zu modifizieren. Die Forschergruppe um Neil Thomas, Professor für Medizinische und Biologische Chemie an der Universität Nottingham (UK), baute dazu eine reaktive nicht-kanonische Aminosäure in Spinnseidenprotein ein.⁴³ Die reaktive Seitenkette dieses nicht-kanonischen Proteinbausteins wurde anschließend selektiv mit einem Antibiotikum verknüpft. Durch die natürliche Eigenschaft des Spinnseidenproteins, Fasern zu bilden, entstand ein antibiotisch wirksames Material, das zum Beispiel als „intelligente“ Gaze in der Wundbehandlung Anwendung finden könnte. Indem Seidenraupen mit der reaktiven nicht-kanonischen Aminosäure gefüttert werden, ist es möglich, die Seide mit einem Fluoreszenzfarbstoff selektiv und stabil zu färben.⁴⁴ In Zukunft sind solche chemischen Modifikationen von Proteinmaterialien wie Seide, Kollagen oder Muschelproteinen denkbar, die etwa durch Kopplung mit Antibiotika als Wundauflage, durch Modifikation mit Wachstumsfaktoren in der Gewebezüchtung oder im Fall des Muschelproteins als biologischer Kleber⁴⁵ industrielle Anwendung finden könnten (siehe Abbildung 5). Limitierende Faktoren sind derzeit noch die relativ niedrigen Proteinausbeuten in Verbindung mit erheblichen Kosten für die nicht-kanonischen Aminosäuren. Die Biosynthese der Verbindungen aus preisgünstigen Vorstufen stellt einen Weg dar, die Kosten für die biotechnologische Herstellung der ortsselektiv modifizierten Proteinmaterialien in Zukunft stark zu senken und der Industrie mit nicht-kanonischen Aminosäuren neue Ausgangsstoffe für „smarte“ Biomaterialien zu liefern.

43 | Vgl. Harvey et al. 2017.

44 | Vgl. Teramoto et al. 2018.

45 | Vgl. Budisa/Schneider 2019.

2.4 Biologisch inspirierte Hybridmaterialien

Prof. Dr. Markus Antonietti

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

Besonders im Bereich der Hybridmaterialien – Verbünde aus organischen Polymeren und anorganischen kristallinen Nanostrukturen – hat die Natur Unglaubliches geleistet. Ein Beispiel hierfür sind Muschelschalen beziehungsweise Perlmutter (aus Chitin, Proteinen und Kalziumcarbonat hergestellt), wobei der gewachsene Verbund 5.000 Mal so zäh ist wie das kristalline CaCO_3 , aus dem es gemacht ist.

Muschelschalen sind ebenso wie Zähne in der „kambrischen Revolution“ durch ein Wettrüsten von Beute und Jäger entstanden, wobei Kalk im Grunde ein Abfallprodukt aus „hartem Wasser“ und metabolisch erzeugtem CO_2 ist und damit mitnichten ein Material, aus dem man üblicherweise Werkstoffe herstellen würde. Die Natur nutzt jedoch das Verfügbare.

Biomimetische Materialien, die nach den gleichen Prinzipien aufgebaut sind, unterliegen jedoch nicht den gleichen biologischen Beschränkungen (Synthese in Wasser bei Raumtemperatur, neutraler pH-Bereich und viele mehr). Sie sind eben „mimetisch“ und nutzen lediglich die Strukturprinzipien. So können zum Beispiel

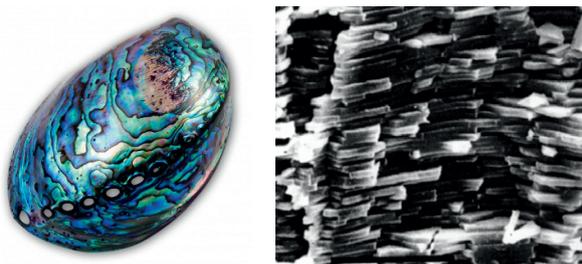


Abbildung 6: Perlmutter der Abalonia-Schale und die konstituierende Nanostruktur im Rasterelektronenmikroskop. Die Farben kommen daher, dass die Dicke der Plättchen im Bereich der halben Lichtwellenlänge liegt und die Plättchen somit als Bragg-Spiegel wirken. Perlmutter ist nicht nur sehr bruchfest, sondern auch nichthaftend, nichtverschmutzend und erlaubt konforme Beschichtungen (Quelle: Markus Antonietti, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung MPIKG).

Plättchen aus superhartem Wolframcarbid oder superfesten Graphenen mit modernen, hochstabilen Harzen verbunden werden, sodass neue Verbundmaterialien entstehen, aus denen eine neue Generation von Flugzeugen oder die Sicherheitszelle von zukünftigen Formel-1-Autos aufgebaut sein könnte.

Biologische Inspiration der nächsten Generation geht in der Forschung so weit, dass solche Verbundmaterialien am Ende ihres Werkstofflebens auch wieder abbaubar sein sollen, um die Grundstoffe in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Bei Muschelschalen oder Knochen ist der Abbau kein Problem. Ähnliche „schaltbare chemische Schwachstellen“ können auch bei der Materialauswahl berücksichtigt werden. „Nanozellulose“ hat das Potenzial, Kohlenstofffasern in vielen Bereichen zu ersetzen. Ähnliches gilt für ligninartige Klebstoffe, die Epoxidharze überflüssig machen können, wobei offensichtlich Holz als Inspiration und Quelle von „bioinspirierten“ Molekülen dient. So wird die übernächste Generation von Flugzeugen, Schiffen oder Häusern möglicherweise doch wieder zu Teilen „aus Holz“ sein, allerdings ohne die biologisch bedingten Schwächen dieses klassischen Werkstoffs.

2.5 Bioinspirierter elastischer Zement⁴⁶

Prof. Dr. Helmut Cölfen

Physikalische Chemie, Universität Konstanz

Biomaterialien, die von lebenden Organismen hergestellt werden, weisen unübertroffene Eigenschaften auf. So gelingt es beispielsweise der Muschel, mit Perlmutter ein Material aufzubauen, welches bis zu 5.000 Mal bruchfester ist als der Kalk, aus dem es zu 95 Prozent besteht. Diese herausragenden Eigenschaften liegen unter anderem in der hierarchischen Struktur dieser Materialien begründet – einer Ziegel-Mörtel-Architektur von der Nanometer- bis in die Mikrometerskala. Außerdem ist dafür ein Materialkontrast aus harter, aber spröder anorganischer und weicher, aber elastischer Materie verantwortlich. Einen ähnlichen Aufbau haben auch so verschiedene Materialien wie Knochen oder ein Seeigelstachel. Jeder, der einmal unabsichtlich auf einen Seeigel getreten ist, weiß, dass dieser Stachel keineswegs brüchig ist wie Kalk, aus dem er besteht, sondern dass er bruchfest ist und dadurch als Abwehrmechanismus gegen Fressfeinde dienen kann.

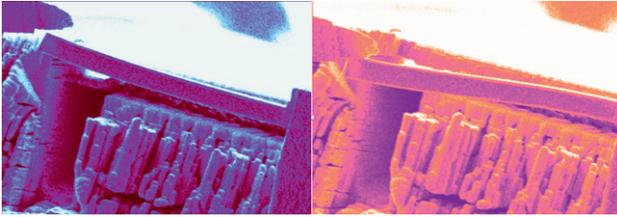
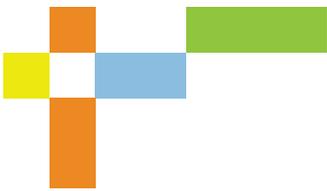


Abbildung 7: Mikromanipulator-Experiment mit einem $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ großen Balken aus mesokristallinem Zement. Links: vor dem Experiment. Rechts: deutliche Biegung des Balkens unter Druck, ohne zu brechen. Nach der Deformation kehrt der Balken wieder in die Originalposition (links) zurück, was vorteilhafte elastische Deformation bedeutet; alle Energie wird reversibel zurückgegeben (Quelle: Helmut Cölfen, Universität Konstanz).

Dieser Ziegel-Mörtel-Aufbau auf der Nanometerskala kann auch auf synthetische Materialien angewendet werden. Wir haben daher versucht, dieses Bauprinzip auf Kalziumsilikathydrat (CSH), den Binder im Zement, zu übertragen. Dazu wurden mit einer biologischen Bibliothek zunächst die besten und selektivsten Bindemotive für Moleküle identifiziert und dann ein synthetisches Analogon gesucht. Es zeigte sich bei der Verwendung dieses Additivs bei der CSH-Synthese tatsächlich ein Ziegel-Mörtel-Aufbau der Zementteilchen mit weichen Polymeren an den Grenzflächen auf der Nanometerskala. Das heißt, der biologische Aufbau des Seeigelstachels konnte erfolgreich durch Selbstassemblierung der CSH-Plättchen in Gegenwart eines makromolekularen Additivs realisiert werden.

Mechanische Tests (siehe Abbildung 7) zeigten eine elastische Deformation des Probekörpers, ohne zu brechen. Berechnungen der Bruchfestigkeit aus der Verbiegung ergaben eine Bruchfestigkeit des Perlmutter – des Goldstandards für alle bioinspirierten Materialsynthesen in diesem Bereich –, die etwa hundert Mal höher ist als die von Zement und Beton.

Das bedeutet, dass selbst mit dem so heterogenen, aber meistverwendeten Baumaterial der Menschheit, nämlich Zement, herausragende Materialeigenschaften bei entsprechender Nanostrukturierung zu erzielen sind; diese ermöglichen wesentlich dünnere Baukonstruktionen bei gleicher Festigkeit oder in Zukunft vielleicht ein Bauen ohne Stahlkonstruktionen. Dennoch ist hier hervorzuheben, dass diese Arbeiten zwar zeigen, was theoretisch mit konventionellen Baumaterialien möglich wäre, ein Upscaling auf die derzeit verbauten Mengen ist derzeit aber nicht möglich und auch preislich unattraktiv.

2.6 Interview Lin Römer, Firma AMSilk

Dr. Lin Römer ist Managing Director und Mitbegründer der Firma AMSilk. Er ist Biochemiker und für die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Firma verantwortlich.

Herr Dr. Römer, was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in den Material- und Werkstoffwissenschaften in den letzten Jahren?

Für mich ist es die besondere Kombination: Hochleistungsmaterialien aus biologischen Grundstoffen. Tolle neue Produkte sollen eine gute Performance haben, aber auch nachhaltig sein. Diese Kombination ist mithilfe von erdölbasierten Materialien schwer zu erzielen – und dass wir alle zu Jutetaschen und Baumwollprodukten zurückgehen, ist wahrscheinlich auch nicht der beste Weg. Wir müssen neue Materialien mit existierenden kombinieren: Wenn man es schafft, in einigen Produkten zunächst nur einige wenige Prozent durch nachhaltigere Materialien zu ersetzen, dann ist das ein sehr guter Schritt, und den sollte man auch gehen.

Welche Rolle spielen Vorbilder aus der Natur für die Materialentwicklung in Ihrer Firma?

Wir orientieren uns an Spinnenseide, die Spinnen in der Natur zum Bau von Spinnennetzen verwenden. Diese Seide besteht komplett aus Proteinen. Das Interessante ist, dass wir uns bei unserer Materialentwicklung anfangs zwar am Spinnennetz orientiert haben, aber dass die Produkte, die wir jetzt auf dem Markt haben, mit einem Spinnennetz gar nicht mehr viel zu tun haben. Es geht somit eher darum, ein in der Natur vorkommendes Material erst einmal biotechnologisch herzustellen und dann in einem weiteren Schritt zu schauen, in welchen Bereichen es sinnvoll einzusetzen ist. Wir stellen zwar auch Fasern her, die den natürlichen Spinnenfasern sehr ähnlich sind, das ist aber eben nur ein Aspekt. Unsere Proteine kommen beispielsweise als Gel oder Pulver im Kosmetikbereich zum Einsatz oder als Beschichtung von Implantaten im Medizintechnikbereich. Wir schauen also von der Natur ab, verbessern, optimieren die Prozesse und setzen das Ergebnis der Entwicklung möglichst breit ein – und nicht nur da, wo die Natur es vorgemacht hat.

Ihre Kosmetikprodukte sind dann also letztlich weniger an der Natur angelehnt als die Textilprodukte?

Genau. Bei den Kosmetikprodukten und der entsprechenden Funktion der biologisch inspirierten Materialien haben wir uns natürlich nicht am Spinnennetz orientiert, sondern wir haben festgestellt, dass die Spinnenseide in der Lage ist, die Haut zu beschichten und damit zu schützen: Es entsteht eine zweite Haut – aus reinem Protein –, die unsere eigene Haut vor äußeren Einflüssen schützt. Wir haben also nicht irgendein Acrylat, ein Plastik oder eine Fettschicht auf der Haut. Die Spinnenseide hat Vorteile gegenüber existierenden Materialien und viele gute Eigenschaften, die in der Kosmetik stark nachgefragt sind. Die Vorteile sind so überzeugend, dass der Kosmetikbereich der AMSilk kürzlich an das internationale Spezialchemie-Unternehmen Givaudan S. A. aus der Schweiz verkauft werden konnte. Givaudan plant, die Seidentechnologie weiter auszubauen und viele neue Produkte anbieten zu können.

Was sind denn die großen Hürden und Herausforderungen für Sie?

Das „Upscaling“, also die Herstellung großer, industrierelevanter Mengen war (und ist) für uns eine sehr große Herausforderung, weil es zeit- und kapitalintensiv ist. Man braucht sehr große Anlagen und viel Zeit zum Aufbau solcher Anlagen, um relevante Mengen zu produzieren. Diese neuen Materialien sind dann am Anfang alle teurer als etwa ein erdölbasiertes Material, das seit sechzig Jahren optimiert wurde und bereits in Millionen Tonnen produziert wird. Für ein Produkt, das am Anfang vielleicht etwas teurer ist, muss am Markt erst Akzeptanz geschaffen werden. Andererseits muss es grundsätzlich darum gehen, nachhaltigere Alternativen aufzuzeigen, die nicht unbedingt mit Verzicht einhergehen.

Welche Fortschritte erwarten Sie in den nächsten Jahren im Bereich der bioinspirierten Materialentwicklung?

Ich bin der festen Überzeugung, dass uns in den nächsten 10 bis 15 Jahren biotechnologische und insbesondere proteinbasierte Materialien überall im Kaufhaus begegnen werden, sei es der Turnschuh, den wir gemeinsam mit Partnern entwickelt haben, oder andere Produkte. Neue Materialien kommen nach und nach am Markt an und werden akzeptiert – da wird sich in den

nächsten Jahren noch viel entwickeln. Wie bereits beschrieben, die Kombination ist wichtig: neue Performance, neue Eigenschaften und gleichzeitig mit einem nachhaltigen Gedanken. Denn wir wollen ja nicht alle auf gute Produkte verzichten – aber trotzdem die Umwelt schonen. Wir müssen neue Wege gehen, die verträglicher für unseren Planeten sind. Die Innovation ist der Anfang, aber letztendlich muss diese dann auch am Markt ankommen. Da gibt es bisher leider noch nicht viele erfolgreiche Beispiele in diesem Bereich.



Abbildung 8: Adidas-Prototyp Hochleistungsperformance-Sportschuh aus Biosteel®-Faser (Quelle: Adidas)



Abbildung 9: Texturierte Silikonimplantate der Firma POLYTECH werden durch eine dünne, homogene Beschichtung aus Seidenprotein verbessert (Quelle: AMSilk)



3 Additive Fertigung

Prof. Dr. Jürgen Groll

Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe der Medizin und der Zahnheilkunde, Universität Würzburg

Prof. Dr. Thomas Scheibel

Lehrstuhl für Biomaterialien, Universität Bayreuth

Die Additive Fertigung (AF), oftmals auch umgangssprachlich als 3D-Druck bezeichnet, ist in einer gemeinsamen Begriffsdefinition nach den Standards ISO und ASTM beschrieben als „Prozess, der Materialien verbindet, um Bauteile basierend auf dreidimensionalen (3D) Modelldaten in der Regel Schicht für Schicht zu erstellen“.^{47,48} Technologien der Additiven Fertigung eröffnen interessante Möglichkeiten – insbesondere, um Funktionsmaterialien und Bauteile mit komplexer heterogener Struktur zu produzieren.⁴⁹ Die Geburtsstunde des 3D-Drucks war vermutlich die Patentierung der Stereolithografie durch Charles Hull⁵⁰ im Jahr 1986. In der Folge wurden verschiedene Techniken entwickelt wie „Powder Bed Fusion“, „Fused Deposition Molding“, „Inkjet Printing“ oder „Contour Crafting“, um nur einige zu nennen.

Additive Fertigung findet mittlerweile in vielen Gebieten Anwendung, zum Beispiel in der Bauwirtschaft, im Prototyping oder in der Biomedizin.⁵¹ Zu den Beispielen aus der Industrie, bei denen Additive Fertigung bereits in der Serienfertigung von Bauteilen zur Anwendung kommt, gehören 3D-gedruckte Komponenten für Boeings Dreamliner, 3D-gedruckte Triebwerkskomponenten von General Electric und über eine Million 3D-gedruckte Fahrzeugkomponenten bei BMW – allesamt ein Indiz für die Relevanz von Additiver Fertigung in der Industrie 4.0. Der Vorteil dieser Fertigungstechnologie liegt darin, dass Materialien und Bauteile gefertigt werden können, die lokal definierte chemische und mechanische Eigenschaften in Kombination mit einer dezidierten 3D-Mikro- und -Makrostruktur aufweisen können – diese Eigenschaften sind mit konventionellen Verarbeitungsmethoden nicht zugänglich.

Inspiration kommt dabei oftmals direkt aus der Natur beziehungsweise von biologischen Systemen: Dort werden anisotrope Bausteine mit optimierter Größe und Aspektverhältnis über viele Längenskalen organisiert. Eine Kombination aus starken und schwachen Bindungen zwischen diesen Bausteinen wird dazu genutzt, dynamische Funktionen zu erzeugen (mit den interessanten Möglichkeiten der Adaptation, Re-Modellierung, Selbstheilung etc.).⁵² Das Potenzial von Additiver Fertigung liegt in der Fabrikation und der evolutionären Weiterentwicklung von Material- und Bauteileigenschaften.⁵³ Dies zeigt sich vor allem im Bereich der personalisierten Medizin, insbesondere bei der Geweberegeneration. Die Verarbeitung von Biomaterialien mittels Additiver Fertigung und der anschließende Kontakt des Konstrukts mit biologischen Komponenten, sei es durch Zellbesiedelung oder in der Anwendung als Implantat, gewinnen zunehmend an Bedeutung für diverse klinische Anwendungen (siehe auch Kapitel 3.1 und 3.2). Eine bioaktive Funktionalisierung von Polymeren, die eine spezifische Wechselwirkung mit Zellen erlaubt, bereitet in Kombination mit geeigneten Fabrikationstechniken den Weg für die Entwicklung gewebemimetischer Zell-Material-Konstrukte als In-vitro-Modelle und für die regenerative Medizin. Die gleichzeitige Verarbeitung von Zellen und Materialien zu dreidimensionalen Zell-Material-Hybridstrukturen wird als Biofabrikation bezeichnet.⁵⁴ Im Gegensatz zum bisher üblichen 3D-Druck von Biomaterialien werden in diesem jungen und sehr aktiven Forschungsfeld also Zellen enthaltende Formulierungen, sogenannte Biotinten, direkt verarbeitet.⁵⁵ Dies stellt wesentlich höhere Ansprüche an die Materialien und Druckprozesse, da der komplette Verarbeitungsprozess unter zellverträglichen Bedingungen ablaufen muss (wässrige Umgebung, physiologische Temperaturen, Salzkonzentrationen etc.). Das schränkt die Wahl der Fabrikationsmethoden, der Materialien sowie der nutzbaren chemischen Reaktionen zur Verfestigung der Strukturen nach dem Druck deutlich ein.

Nimmt man derzeitige Techniken der Additiven Fertigung als Grundlage, so ist deren Potenzial bei Weitem nicht ausgeschöpft. Es werden heutzutage immer noch ausschließlich Ein-Komponenten-Systeme verarbeitet, welche häufig aus einem kleinen Kreis kommerziell erhältlicher Materialien stammen. Dies führt zu einer Limitation in den physikalisch-chemischen Eigenschaften,

47 | Siehe ASTM/ISO 2013.

48 | Vgl. acatech et al. 2016.

49 | Vgl. Studart 2016.

50 | Vgl. Hull 1986.

51 | Vgl. Ngo et al. 2018.

52 | Vgl. Studart 2016.

53 | Vgl. Ebd.

54 | Vgl. Groll et al. 2016.

55 | Vgl. Groll et al. 2018.

aber auch in den zu erzielenden Strukturen der 3D-gedruckten Bauteile. Zudem sind viele 3D-Drucker derzeit auf einige wenige Tinten und Materialien beschränkt und nicht mit anderen Materialien kompatibel. Auch die Auflösung der Drucker ist in vielen Fällen bei Weitem nicht in dem Bereich, in dem biologische Vorbilder (Mikro-)Strukturen generieren können. In Bezug auf die Biofabrikation ist es zudem wichtig, anzumerken, dass dieses Forschungsfeld noch in den Kinderschuhen steckt. Die Kernhypothese, dass eine intrinsisch angelegte Hierarchie in Zell-Material-Konstrukten Vorteile erzielt, um Ersatzgewebe mit funktionalen Charakteristika zu entwickeln, muss für verschiedene Anwendungen noch verifiziert werden (siehe auch Kapitel 3.1 und 3.2). Eine Kernherausforderung des Forschungsfelds stellt derzeit noch der Mangel an Materialien dar, die für Biofabrikation verwendbar sind und damit die Grundlage für Biotinten bilden.^{56, 57} Hohe Druckauflösungen können oft nur unter Bedingungen erreicht werden, die für Zellen nicht ideal sind, während eine hohe Zellkompatibilität aufgrund niedriger Materialanteile in den Formulierungen zulasten der Formtreue der Konstrukte geht. Aktuell stellt daher die Erweiterung dieses sogenannten Biofabrikationsfensters eine zentrale Forschungsrichtung der Biofabrikation dar: Maßgeschneiderte (Bio-)Polymere bilden die Materialgrundlage; supramolekulare Wechselwirkungsprinzipien rücken in den Fokus der Forschung, um Rheologie und Zellverträglichkeit beeinflussen zu können. Zudem müssen zukünftige Biotinten nicht nur druckbar sein, sondern sollen das Verhalten der Zellen nach dem Druckprozess und die Gewebereifung auch gezielt steuern können. Um erfolgreich (multi)funktionale Gewebe zu erzeugen, sind ferner sowohl eine präzise Kenntnis von den gewebespezifischen Strukturen und Material- sowie Zellkombinationen und deren Interaktion essenziell als auch das Verständnis darüber, wie Gewebe entwicklungsbiologisch entsteht. Im Bereich der biomedizinischen Anwendungen stellen die Fragen zur Regulation der Zulassung sowie zur Qualitätssicherung weitere Hürden dar.

Die Additive Fertigung ermöglicht es grundsätzlich, Material beziehungsweise ein Bauteil nach dem Vorbild der Natur herzustellen: Sie erlaubt, dass multifunktionale, dynamische (das heißt über die Zeit oder durch externe Auslöser sich ändernde) Strukturen mit orts aufgelöster Chemie, Mechanik und Funktion geschaffen werden – es handelt sich also um eine multi-kriterielle und nicht um eine mono-kriterielle Entwicklung, wie sie heutzutage noch Ingenieurstandards entspricht. Die dreidimensionale Nachahmung im Bereich der Biomedizin, zum Beispiel gewebespezifischer hierarchischer Strukturen in der Kombination

verschiedener Zellen und Materialien, bringt deutliche Fortschritte etwa in Bezug auf die Bildung neuer Blutgefäße, die Ausbildung funktionaler Charakteristika sowie die Geschwindigkeit der Reifung gegenüber der klassischen 3D-Gewebezüchtung. Es ergeben sich bisher unerschlossene Möglichkeiten für das rationale Design von 3D-in-vitro-Gewebemodellen mit großem Potenzial in verschiedenen Anwendungsgebieten: für das Testen von Medikamenten anstelle von Tierversuchen, als standardisierbare Modelle für die Forschung und langfristig auch als therapeutische Option in der regenerativen Medizin für die Klinik. Jüngste Forschungen zeigen, dass für manche Gewebe die Nutzung von in Stammzellen angelegten Programmen eine sehr vielversprechende Strategie darstellen kann. Zu solchen Programmen gehört beispielsweise der endochondrale Prozess der Knochenentstehung aus Knorpel.

Die Additive Fertigung setzt neue Maßstäbe und ermöglicht einen Paradigmenwechsel beim Materialdesign in einer Art und Weise, die bislang nur der Natur vorbehalten war. Funktionen werden zukünftig nicht mehr einzig über die Materialchemie und die Zusammensetzung bestimmt, vielmehr werden gradierte und texturierte heterogene Architekturen der 3D-gedruckten Bauteile die multi-kriterielle Entwicklung neuer Anwendungen revolutionieren. Dabei stehen sowohl die Identifizierung und Überwindung der druckseitig bestehenden technischen Limitationen im Vordergrund als auch die Entwicklung von Strategien, um hierarchische Strukturen in gedruckten Bauteilen dynamisch zu ändern (zum Beispiel 4D-Druck-Strategien zur zeitabhängigen Anpassung der Strukturen und Funktionen auf die sich ändernde Aufgabe), sowie das Design heterogener Composite, die lokal so adaptiert werden können, dass sie in sich ändernden Umgebungen funktionell bleiben. Im Fokus der Forschung sollten außerdem die Entwicklung nachhaltiger, biokompatibler und bioabbaubarer Materialien stehen, die trotzdem in langzeitstabilen und defekttoleranten Bauteilen genutzt werden können, sowie der Einfluss von Materialien und Fabrikationsbedingungen auf das Verhalten von Zellen während und nach dem Fabrikationsprozess. Schließlich werden die Entwicklung von Qualitätssicherungsverfahren, eine zerstörungsfreie In-Prozess-Kontrolle und die Zusammenführung verschiedener Methoden der Additiven Fertigung untereinander als auch mit konventionellen Methoden von zentraler Bedeutung sein.

Die Additive Fertigung von zellbasierten lebenden Materialien wird in den beiden nachfolgenden Interviews beleuchtet (siehe Kapitel 3.1 und 3.2).

56 | Vgl. Malda et al. 2013.

57 | Vgl. Jungst et al. 2016.



3.1 Interview Héctor Martínez, Firma CELLINK⁵⁸

Dr. Héctor Martínez ist Chief Technology Officer bei CELLINK, einem Biotechnologie-Start-up, das Biotinten und Bioprinter für die Kultivierung verschiedener Zelltypen entwickelt.

Herr Dr. Martínez, was war für Sie die wichtigste Entwicklung auf dem Gebiet der Biologisierung in den Materialwissenschaften?

Materialien sind äußerst wichtig, um die Biologie auf die nächste Stufe zu heben, aber ebenso wichtig waren die Entwicklungen, die Hardware- und Softwaretechnologien erschwinglicher gemacht haben: Geräte, die früher Hunderttausende Dollar kosteten, sind jetzt für Zehntausende erhältlich. Auch in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit hat sich vieles verändert: Früher waren solche Geräte für Ingenieurinnen und Ingenieure konzipiert, heute für eine multidisziplinäre Gruppe mit einem besonderen Fokus auf Biologinnen und Biologen. Das gilt auch für die Software. Die Systeme sind immer einfacher zu verstehen, was den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Arbeit erleichtert.

Wie hoch bewerten Sie das Innovationspotenzial von aus der Natur abgeleitetem Wissen für Ihr Unternehmen und im Allgemeinen?

In der Biotechnik wird beispielsweise zu hundert Prozent auf die Vorbilder aus der Natur geschaut: Wie setzt sich der Naturstoff zusammen, und was ist ein möglicher Anwendungsbereich? Auch in der Mechanik und Robotik gibt es gut etablierte Software in Anlehnung an natürliche Prozesse, insbesondere in der Künstlichen Intelligenz ist viel vom Gehirn inspiriert. Es kommt also sehr auf die jeweilige Innovation an.

Gehen wir nochmal zurück zum Innovationspotenzial, sehen Sie welches?

Die Antwort ist ein absolutes Ja! Weltweit werden neue Institutionen gegründet. Wir arbeiten in mehr als fünfzig Ländern und sehen immer mehr Forschungsabteilungen für biologisch inspiriertes oder biomimetisches Engineering. Es ist spannend, wie dort Forscherinnen und Forscher aus all diesen verschiedenen Disziplinen über eine gemeinsame Frage nachdenken!

Sie haben erwähnt, dass Sie in vielen Ländern arbeiten. Welches sind die Spitzenreiter in diesem Bereich, und wie sehen Sie sie im Vergleich zu anderen?

Aufgrund der zahlreichen Veröffentlichungen und innovativen Ergebnisse sehe ich die USA an der Spitze. An den US-amerikanischen Universitäten forscht eine Mischung aus sehr heterogenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, aus Studierenden, Postdocs und Dozierenden aus der ganzen Welt, die ihre Gehirne zusammenbringen und etwas Erstaunliches schaffen. Wir haben einen guten Zugang zu dem, was unsere Kunden auf der ganzen Welt tun, und sehen, dass die USA führend sind. Aber es ist schwer zu sagen, welches Land an zweiter Stelle ist. Ich sehe Japan weit entwickelt und natürlich Deutschland, Großbritannien, Singapur und China.

Aber wie schaffen Sie Raum für Innovationen? Wir denken, dass die Grundlagenforschung in Deutschland stark ist, aber wie überträgt man das auf die Innovation?

In Europa gibt es unterschiedliche Kulturen, aber trotzdem noch eine gemeinsame Denkweise. In den USA fragt die Forschung: „Was ist das Neueste? Wurde es schon einmal gemacht? Nein? Dann mache ich es!“ Sie müssen kein Experte sein, Sie machen es einfach! In Schweden und Deutschland geht es eher um Folgendes: „Okay, es gibt etwas Neues. Das klingt interessant. Aber ist es schon einmal gemacht worden? Nein? Was sind die Risiken? Was machen andere Felder, können wir das kombinieren?“ Als Firmenvertreter muss ich also viel mehr Überzeugungsarbeit leisten, da ist in der Regel einfach mehr Skepsis in Europa.

Gehen wir einen Schritt zurück: Was genau verkauft Ihr Unternehmen, und inwiefern ist das biologisch inspiriert?

Unsere Firma verkauft verschiedene Biotinten, Bioprinter und entsprechende Software. Wenn Sie beispielsweise ein menschliches Gewebe nachbilden, besteht einer der wichtigsten Schritte darin, das Gefäßbett einzubauen. Wir nutzen Pflanzen als Vorbilder und integrieren deren Gefäßtyp in das Gewebe. Wir haben Technologien entwickelt, mit denen wir die Vaskularität zum Beispiel eines Blattes nachahmen und drucken können. Dadurch machen wir die gedruckten Gewebe gewebeartiger.

58 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.

Was sind derzeit die größten Herausforderungen, und wie schätzen Sie in den nächsten Jahren die Entwicklungen ein?

Es geht darum, zu sehen, was meine Kunden tun: Wie können sie mit dem, was wir ihnen bieten, Innovationen schaffen, und welche Anwendungen lassen sich mit dem Biodruck lösen? Dann folgt die Frage: Was könnte diejenige Anwendung sein, die dem Markt am nächsten kommt? Und schließlich arbeiten wir mit den Kunden zusammen, um die Anwendung voranzutreiben. Dazu kooperieren wir mit Partnern, wie verschiedenen Institutionen und Transferstellen. Mit der Technologie und den Ressourcen, die wir heute haben, müssen wir die Grenzen des Machbaren ausloten, aber gleichzeitig auch sicherstellen, dass wir die Erwartungen richtig setzen.

3.2 Interview Lutz Kloke, Firma Cellbricks GmbH

Dr. Lutz Kloke ist Gründer und CEO der Cellbricks GmbH. Die Firma ist spezialisiert auf Bioprinting – den Druck mit biologischem Material.

Herr Dr. Kloke, was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in den Material- und Werkstoffwissenschaften in den letzten Jahren?

Meine initiale Antwort ist natürlich „Additive Fertigung“! Industrielle Produktion wird durch Additive Fertigung gerade massiv verändert. Dies wird an Beispielen wie dem Drucken eines ganzen Flugzeugflügels sichtbar – am liebsten würde man gleich das ganze Auto im 3D-Drucker produzieren! Aber die Additive Fertigung bewegt sich gerade auch in die Biologie hinein beziehungsweise ist schon mittendrin, und das ist aus unserer Sicht ein spannender Prozess. Im Allgemeinen würde ich sagen, dass technische Verfahren, die in Schnittstellenbereichen angewendet werden und ursprünglich gar nichts miteinander zu tun hatten, immer relevanter werden: zum Beispiel eben die Kombination von Additiver Fertigung und Biotechnologie.

Und was kann man sich da von der Natur abschauen?

Die Natur musste lernen, mit Energie und Material sparsam umzugehen und effizient zu bauen, und davon können wir uns inspirieren lassen und daraus Ableitungen treffen.

Welche Rolle spielen Vorbilder aus der Natur für die Materialentwicklung in Ihrer Firma?

Wir versuchen zum Beispiel, die Barrierefunktion einzelner Körperteile nachzubilden, zum Beispiel der Plazenta. Für schwangere Frauen gibt es wenig Sicherheit, ob Arzneimittel genommen werden können oder nicht, weil man nicht weiß, ob sie plazentagängig sind. Also versuchen wir, die Barrierefunktion der Plazenta in der Petrischale abzubilden, um dann entsprechende Tests mit den Medikamenten zu machen. Auch das Drucken von Knorpeln interessiert uns: Das wäre wahnsinnig spannend, und es gibt einen großen Markt. Da geht es um eine eigentlich einfache Struktur, aber noch fällt es uns schwer, sie eins zu eins abzubilden. Das sind die Fragen, an denen wir tüfteln und im Moment forschen.

Und wie kommt da die Additive Fertigung ins Spiel?

Wir versuchen, diese Strukturen zu drucken. Die Präzision muss im Mikrometermaßstab liegen, das heißt, um die gewünschte Funktion abzubilden, müssen sich die Zellen exakt an bestimmten Positionen befinden, an denen sie ihre Wirkung entfalten. Natürlich geht es da um dreidimensionale Architekturen, und das ist nur mit Additiver Fertigung zu bewerkstelligen.

Haben Sie ein Produkt am Markt?

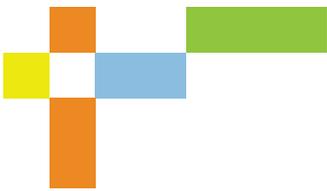
Voraussichtlich werden wir im Spätsommer 2019 ein Barrieremodell auf dem Markt haben.

Was sind aus Ihrer Sicht die großen Hürden für die Entwicklung und Umsetzung in diesem Bereich in der Zukunft?

Die Akzeptanz der Kunden. Wenn Deutschland ein technologischer Vorreiter in diesem Bereich sein will, werden wir uns stark auf Deep-Tech-Sprunginnovationen konzentrieren müssen. Es wird wichtig sein, unsere Kernindustrien auf die Neuerungen vorzubereiten, die jetzt kommen werden.

Spielt da denn die Biologisierung der Materialwissenschaften eine Rolle für Sie?

Sie hält auf unterschiedlichen Ebenen Einzug, und gerade die biologisch-technische Schnittstelle wird interessant sein, zum Beispiel im Gesundheitsbereich. Die Biologisierung passiert schon, und wir müssen aufpassen, sie nicht zu verpassen!



Welche Rahmenbedingungen würden Sie sich dafür wünschen?

Ich wünsche mir, dass in der Politik ein Bewusstsein dafür entsteht, was Biologisierung werden könnte. Kleine und mittelständische Firmen, die in diesem Hochrisiko-Bereich arbeiten, müssten stärker unterstützt werden. Ich würde mir auch wünschen, dass große Unternehmen verstärkt mit Startups kooperieren und dass dafür Anreize geschaffen werden, zum Beispiel über Steuersparmodelle.

Wo liegen aus Ihrer Sicht die spezifischen Stärken und Schwächen Deutschlands in diesem Bereich?

Deep-Tech können wir gut – also technologisch aufwendige Vorhaben, für die es noch kein Produkt gibt und die eher in den Bereich Grundlagenforschung hineingehen. Nicht so gut sind wir hingegen in der Überführung: Wenn es eine gute Produktidee gibt, müssen wir das auch wirklich ein Produkt werden lassen! An diesem Translationsflaschenhals müssen wir arbeiten.

Wie würden Sie da Deutschland im internationalen Vergleich sehen?

Ich glaube, wir wurden beispielsweise von China bereits überholt. Dort herrscht ein ganz anderer Innovationsdruck und eine

ganz andere Innovationsgeschwindigkeit. Ob das gute oder schlechte Auswirkungen hat, wird sich zeigen.

Aber denken Sie trotzdem, dass Deutschland eine Rolle spielen kann beziehungsweise momentan spielt?

Ja, kann! Und tut es auch! Es ist großes Potenzial da, aber wir sind manchmal ein bisschen zu grau und bürokratisch, was uns bremst. Mehr Mut zur Investition auf verschiedensten Ebenen! Vielleicht brauchen wir eine Generation, die mehr Mut zum Gründen und diese „Hoppla, jetzt versuchen wir es einfach!“-Mentalität hat.

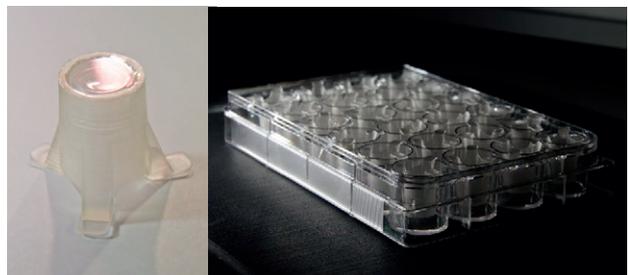


Abbildung 10: Der Cellbricks „Membrick“ dient als standardisierte Grundlage zum Aufbau von dreidimensionalen In-vitro-Barrieremodellen wie zum Beispiel Plazenta, Darm und Lunge (Quelle: Cellbricks GmbH).

4 Bioinspirierter Leichtbau

Prof. Dr. Thomas Speck

Fakultät für Biologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Technische Leichtbaumaterialsysteme und -strukturen sowie deren Optimierung sind seit mehreren Jahrzehnten ein zentrales Thema in Luft- und Raumfahrt. In den letzten Jahren hat der Leichtbau aber auch in anderen wirtschaftlich relevanten Bereichen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Exemplarisch genannt seien an dieser Stelle die Automobilindustrie, hier vor allem getrieben durch den Umstieg auf Elektromobilität (Reichweitenproblematik), das Bauwesen, hier insbesondere aufgrund des zu erwartenden Rohstoffmangels (geeigneter Sand für die Betonherstellung -> Leichtbaubeton) und durch die zunehmende Nutzung alternativer Materialsysteme im konstruktiven Bereich sowie im Maschinenbau, wo Material- und hiermit verbundenen Transportkosteneinsparungen immer bedeutender werden.

Betrachtet man den allgemeinen Kontext, so wird die gesellschaftliche und politische Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung immer stärker – das betrifft alle Technologiebereiche. Der Leichtbau kann wesentlich zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen. Gerade der bioinspirierte Leichtbau wird von zentraler Bedeutung für die zukünftige Entwicklung nachhaltiger Technologien werden, indem ressourcenschonende Ansätze aus der Biologie „entliehen“ und einbezogen werden. Diese Ansätze müssen in vielen Technikbereichen noch entwickelt werden und sollen nach Ablauf der Nutzungsdauer eines technischen Konstrukts ein vollständiges Recycling und die Wiedereinspeisung der verwendeten Rohstoffe (möglichst verlustfrei) in den Materialkreislauf erlauben. An dieser Stelle muss betont werden, dass bioinspirierte (Leichtbau-)Produkte zwar ein hohes Nachhaltigkeitspotenzial besitzen (die Gründe werden nachfolgend detaillierter dargestellt), aber nicht per se nachhaltig sind, weshalb für jedes dieser (Leichtbau-)Produkte eine individuelle Nachhaltigkeitsanalyse erforderlich ist. Wünschenswert wäre hier, dass diese Analyse außerdem die Entwicklung neuartiger Leichtbaumaterialsysteme und -strukturen begleitet und nicht wie bisher lediglich „a posteriori“ stattfindet. Gerade der bioinspirierte Leichtbau hat das Potenzial, neben ökologischen und ökonomischen auch soziale Aspekte der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, da Inspirationen aus der belebten

Natur häufig nicht nur zu besonders funktionellen, sondern auch zu ausgesprochen ästhetischen Ergebnissen führen.⁵⁹ Zudem könnten diese „Bioinspirationen“ dabei helfen, die heute oft deutlich voneinander getrennten Bereiche Natur und Technik wieder besser zu vernetzen.

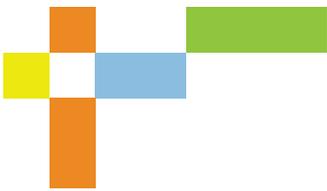
Die Natur bietet vielfältige Inspirationen, die in direkter (biomimetisch) oder indirekter (bioinspiriert) Weise zur Entwicklung und Verbesserung von Leichtbaumaterialsystemen und -strukturen beitragen können. Evolutiv sind Material- und Energieeinsparungen, das heißt Ressourceneffizienz, von großer Bedeutung und stellen einen nicht zu unterschätzenden Selektionsvorteil dar. Dies wurde in der Umformulierung des wohl berühmtesten Zitats von Charles Darwin „Survival of the fittest“ in „Survival of the cheapest“ von Julian Vincent in sehr prägnanter Weise zusammengefasst.⁶⁰

Eine wesentliche Grundlage biologischen Leichtbaus ist die ausgeprägte hierarchische Strukturierung biologischer Materialsysteme, die eine Unterscheidung in Material und Struktur meist unmöglich, zugleich aber auch unnötig macht. In biologischen Leichtbaumaterialsystemen wie Baumstämmen, Frucht- und Samenschalen, Knochen, Seeigelstacheln oder den Panzern von Schildkröten könnten typischerweise zwischen fünf und neun hierarchische Ebenen unterschieden werden: Diese Ebenen reichen vom molekularen Aufbau (Sub-Nanometerbereich) über die Zellwandultrastruktur (Nano- bis Mikrometerbereich), den Zell- und Gewebeaufbau (Mikro- bis Zentimeterbereich) bis hin zum Aufbau des Gesamtorganismus (bei Bäumen im Bereich bis zu maximal hundert Metern) und überspannen somit zwölf Größenordnungen. Biologische Leichtbaumaterialsysteme bestehen typischerweise aus einer zellulären (porösen) Matrix, in die Fasern beziehungsweise Faserbündel in lastoptimierter Richtung und Verteilung eingebettet sind. Dadurch entstehen steife und gleichzeitig zähe Materialsysteme, die zudem ein charakteristisches gutmütiges Versagensverhalten zeigen. Die Fasern sind meist durch mehrere Hierarchieebenen einbeziehende graduelle Übergänge mit der Matrix verbunden, wodurch nicht nur die Gefahr einer Delamination verringert wird, sondern zusätzlich die Dämpfungseigenschaften verbessert werden.

Nach Analyse und Abstraktion des Struktur-Funktions-Zusammenhangs der biologischen Vorbildsysteme können bei gezielter Übertragung einzelner oder mehrerer Strukturparameter neuartige, besonders ressourcenschonende Leichtbaumaterialsysteme gezielt für die Anwendung in verschiedensten Technologiefeldern entwickelt werden. Darüber hinaus ist es

59 | Vgl. Knippers et al. 2019.

60 | Vgl. Vincent 2002.



möglich, diese Materialsysteme bioinspiriert „aufzuschlauen“, sodass sie zum Beispiel selbstadaptiv auf Umwelteinflüsse oder andere Störungen reagieren. Diese Anpassungen werden in ihrer molekularen Struktur gespeichert, wodurch die Materialsysteme „trainierbar“ werden. Zudem lassen sich (kleinere) Schäden in autonomer Weise reparieren, wodurch hochgradig robuste und resiliente bioinspirierte Materialsysteme möglich werden. Durch bioinspirierte Ansätze in den Material- und Werkstoffwissenschaften ist ein hohes Innovationspotenzial gegeben; Paradigmenwechsel bei der Materialsystemfunktionalisierung und Funktionsintegration sind zu erwarten.

Für die Entwicklung solcher neuartigen intelligenten bioinspirierten Materialsysteme ist der Standort Deutschland sehr gut aufgestellt – dank seiner äußerst aktiven und innovativen Materialforschung, die sämtliche Bereiche von der grundlagenorientierten bis hin zur anwendungsnahen und industriellen Forschung beinhaltet, und dank seiner langen und erfolgreichen Tradition in der bioinspirierten Materialentwicklung. Dies zeigt sich exemplarisch im Exzellenzcluster „Lebende, adaptive und energieautonome Materialsysteme (*livMatS*)“. Der Cluster startete im Januar 2019 an der Universität Freiburg und hat zum Ziel, solche bioinspirierten interaktiven und energieautarken Materialsysteme ohne Einbeziehung lebender Zellen zu entwickeln. Leichtbaumaterialsysteme und -strukturen stellen in Industrie und Forschung weltweit ein zunehmend wichtiges Forschungs- und Entwicklungsthema dar. Allerdings wird der Ansatz „Bioinspiration“ für eine Optimierung und Funktionalisierung von Leichtbaumaterialsystemen zwar häufig diskutiert und in der grundlagennahen Materialforschung eingesetzt, die Überführung in marktreife und marktgängige Produkte steckt allerdings noch in den Kinderschuhen. Dieses viel diskutierte „Valley of Death“ kann am effektivsten umgangen beziehungsweise überbrückt werden, wenn an Forschungs- und Entwicklungsprojekten nicht (nur) die F&E-Abteilungen der kooperierenden Firmen beteiligt sind, sondern auch die Vorentwicklungsabteilungen und im Idealfall die Vorserien- und Serienentwicklung.

Eine Herausforderung ist die Tatsache, dass viele innovative bioinspirierte Leichtbaumaterialsysteme und -strukturen auf Verbundmaterialien basieren, bei denen verschiedene technische Fasern (teilweise mit bioinspiriertem Verlauf und Verteilung) in eine poröse oder geschäumte, teilweise gradierte Matrix eingebettet sind. Hierdurch entstehen mechanisch hochbelastbare und extrem leichte Materialsysteme, die zudem funktionalisierbar sind. Solche Systeme stellen jedoch aufgrund ihres Verbundaufbaus eine große Herausforderung für die Trennung in die einzelnen Bestandteile dar; diese ist jedoch für eine Wiedernutzung im Rahmen eines

nachhaltigen Recyclings notwendig. Eine Möglichkeit, für welche die Biologie vielfältige Anregungen bietet (zum Beispiel Blattabwurf), ist es deshalb Methoden zur Trennung der einzelnen Materialkomponenten nach Ablauf der Nutzungsdauer des Leichtbaumaterialsystems zu entwickeln. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, sortenreine Leichtbaustrukturen herzustellen, bei denen einzelne Bereiche desselben Materials produktionstechnisch steifer oder elastischer ausgestaltet werden. Auch dafür finden sich in der Natur vielfältige Vorbilder, etwa hochsteife und extrem elastische Bereiche im Exoskelett von Insekten und Kriebtieren.

4.1 Bioinspirierte Modifikation des Holzes

Prof. Dr. Ingo Burgert und Dr. Tobias Keplinger
Institut für Baustoffe, ETH Zürich, Schweiz

Die zukünftige Biologisierung der Material- und Werkstoffentwicklung wird eng mit einer differenzierteren und anspruchsvolleren Nutzung der nachwachsenden Ressource Holz verknüpft sein. Holz zeichnet sich durch eine poröse Struktur aus, die hohen Anforderungen an mechanische Beanspruchbarkeit genügen kann. Grund hierfür ist die evolutive Optimierung der Struktur des Holzes, um zwei für den lebenden Baum wesentliche, aber konträre Materialanforderungen und Funktionen erfüllen zu können: erstens einen effizienten Wassertransport von den Wurzeln zur Krone, der eine poröse, in Längsrichtung des Baumes ausgerichtete Struktur erfordert, zweitens eine hohe Steifigkeit und Festigkeit, welche durch kompakte Holzfasern garantiert werden, damit der Baum in die Höhe wachsen und Windkräften widerstehen kann. Bezieht man noch zusätzlich das für Bäume erreichbare Alter von mehreren Tausend Jahren in die Betrachtung mit ein, lässt sich das Holz der Bäume im übertragenen Sinne als langlebige, extrem energieeffiziente und mechanisch stabile Leichtbaustruktur bezeichnen.

Somit kann bei der innovativen Entwicklung von holzbasierten Materialien nicht nur die nachwachsende und CO₂-speichernde Ressource Holz gezielt genutzt werden, sondern die natürliche Struktur des Holzes und physiologische Prozesse im Baum können auch als Bioinspiration für ein optimiertes Materialdesign dienen.

Um Holz verbesserte oder neue Eigenschaften zu verleihen und ihm damit zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen, werden technisch ausgereifte und skalierbare Modifikations- und Funktionalisierungsansätze benötigt. Auf diese Weise sollen



Abbildung 11: Zellulosekomposite basierend auf der Synthese von Bioinspiration und Nutzung der nachwachsenden Ressource Holz in modifizierter Form (Quelle: in Teilen aus Frey et al. 2018 und Frey et al. 2019)

zukünftig Materialien mit endlicher Verfügbarkeit und solche, die energieaufwendige Produktionsprozesse benötigen, zumindest annähernd gleichwertig durch die nachwachsende Ressource ersetzt werden können. In der Vergangenheit wurden beispielsweise verschiedene Verfahren entwickelt, um Holz dauerhafter, dimensionsstabiler oder weniger brennbar, aber auch elektrisch leitfähig, magnetisierbar oder transparent zu machen.

Ein Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit, das die vielversprechende Synthese von Bioinspiration und Nutzung der nachwachsenden Ressource aufzeigt, sind hochfeste Zellulosekomposite, die durch das Herauslösen von Lignin aus der Holz Zellwand entstehen. Dieser Prozess ist an die Papierherstellung angelehnt. Allerdings wird eine Vereinzelung der Holzfasern vermieden, und die hierarchische Struktur des Holzes und damit die parallele Faseranordnung bleiben erhalten (siehe Abbildung 11). Die große innere Oberfläche des freigelegten Zellulosegerüsts ermöglicht verschiedenste Ansätze zur Funktionalisierung und damit neue Eigenschaftsprofile. Zusätzlich ist im feuchten Zustand eine vielfältige Formgebung möglich, die für komplexe Bauteilgeometrien genutzt werden kann. So kann beispielsweise ein optimierter Faserlauf, inspiriert durch die Astanbindung im Baum, vorgegeben werden. Durch einen Verdichtungsschritt können auch hochfeste Zelluloseverbunde je nach Anwendung mit einem einheitlichen oder graduellen Dichteprofil hergestellt werden.

Auf Basis dieser Zellulosekomposite lassen sich neue Materialkonzepte entwickeln, welche zu einer optimierten Nutzung der nachwachsenden Ressource Holz für biobasierte Hochleistungswerkstoffe führen können. Bezüglich der Umsetzung in technologische Verfahren und zur Produktentwicklung besteht aber noch intensiver Forschungsbedarf, um die grundlegende Methodik in industrielle Fertigungsprozesse zu überführen.

4.2 Beispiel Faserpavillon auf der Bundesgartenschau Heilbronn, 2019

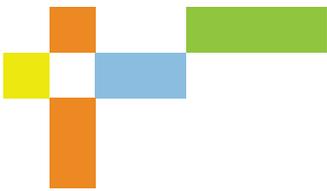
Prof. Achim Menges

Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung,
Universität Stuttgart

Prof. Dr. Jan Knippers

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen,
Universität Stuttgart

Eingebettet in die wellenförmige Landschaft der Bundesgartenschau (BUGA) Heilbronn im Jahr 2019 bietet der BUGA-Faserpavillon seinen Besucherinnen und Besuchern ein einzigartiges architektonisches Erlebnis und einen Blick in die Zukunft des Bauens. Der Pavillon ist das Resultat langjähriger



bionischer Forschung des Instituts für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) und des Instituts für Tragkonstruktion und Konstruktives Entwerfen (ITKE) an der Universität Stuttgart.⁶¹

In der Biologie bestehen die meisten tragenden Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen. Diese bestehen aus Fasern wie zum Beispiel Zellulose, Chitin oder Kollagen und einer stützenden Matrix, welche die Fasern in Position hält. Sowohl die erstaunliche Leistungsfähigkeit als auch die konkurrenzlose Ressourceneffizienz biologischer Strukturen ergeben sich aus ebendiesem Fasersystem. Organisation, Ausrichtung und Dichte der Fasern sind präzise aufeinander abgestimmt und lokal ausdifferenziert, sodass nur dort Material platziert wird, wo es tatsächlich benötigt wird.

Mit dem BUGA-Faserpavillon wird dieses biologische Prinzip des lastangepassten und fein ausdifferenzierten Faserverbundsystems auf die Architektur übertragen. Die verwendeten Verbundwerkstoffe aus Glas- und Kohlestofffaser sind für solch einen Ansatz ideal geeignet, da sie grundlegende Eigenschaften mit biologischen Faserverbundstoffen teilen.

Die tragende Struktur des Pavillons besteht ausschließlich aus Faserverbundwerkstoffen und wird in einem robotergestützten Fertigungsprozess hergestellt. Der Pavillon umfasst eine Grundfläche von rund 400 Quadratmetern und erreicht eine Spannweite von mehr als 23 Metern. Die primäre Tragkonstruktion besteht zur Gänze aus sechzig maßgeschneiderten Faserverbundbauteilen. Mit 7,6 Kilogramm pro Quadratmeter ist diese außergewöhnlich leicht, etwa fünfmal leichter als eine herkömmliche Stahlkonstruktion.

Diese weltweit einzigartige Struktur ist aber nicht nur hocheffizient und sehr leicht, sondern ermöglicht gleichzeitig auch einen unverwechselbaren, authentischen architektonischen Ausdruck und ein außergewöhnliches Raumerlebnis.

Die Konstruktion zeigt, wie die interdisziplinäre Erforschung biologischer Prinzipien in Verbindung mit digitalen Technologien zu einem neuartigen und digitalen Faserverbundbausystem führen kann. Noch vor wenigen Jahren wäre es unmöglich gewesen, einen Pavillon dieser Art zu planen oder zu bauen.



Abbildung 12: Faserpavillon auf der Bundesgartenschau (BUGA) 2019 (Quelle: Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung ICD/Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen ITKE, Universität Stuttgart)

4.3 Interview Stefan Schlichter, Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH

Prof. Dr. Schlichter ist Geschäftsführer der Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH und Professor im Bereich Material Resource Management an der Universität Augsburg. Gleichzeitig ist er Bereichsleiter am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University.

Herr Prof. Schlichter, inwieweit beschäftigen Sie sich mit biologisierten Materialien?

Unsere Aktivitäten beziehen sich auf den „Von der Natur“-Bereich, wir beschäftigen uns hier im Wesentlichen mit der Materialforschung von biobasierten Rohstoffen. Für uns spielt aber auch der Aspekt des Recyclings als Rohstoff- und Materialienquelle eine große Rolle, dazu haben wir gerade ein großes Projekt laufen.

61 | Projektpartner: Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD), Universität Stuttgart: Prof. Achim Menges, Serban Bodea, Niccolò Dambrosio, Monika Göbel, Christoph Zechmeister; Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), Universität Stuttgart: Prof. Jan Knippers, Valentin Koslowski, Marta Gil Pérez, Bas Rongen; FibR GmbH, Stuttgart: Moritz Dörstelmann, Ondrej Kyjaneck, Philipp Essers, Philipp Gülke; Bundesgartenschau Heilbronn 2019 GmbH: Hanspeter Faas, Oliver Toellner.

Was war aus Ihrer Sicht eine der wichtigsten Entwicklungen in dem Bereich der biologisierten Materialwissenschaften in den letzten Jahren?

Der Einsatz natürlicher Rohstoffe für technische Produkte. Naturfasern im Allgemeinen und insbesondere Baumwolle werden ja weltweit gesehen im Moment hauptsächlich, zumindest der Masse nach, im Bekleidungsbereich benutzt. Aber man kann auch Hochleistungsmaterialien auf der Basis nachwachsender Rohstoffe herstellen, zum Beispiel naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK). Die Naturfasern bringen besonders im Bekleidungsbereich eine Menge Vorteile mit sich, sie sind zum Beispiel in Bezug auf die Wasseraufnahme „bekleidungspsychologisch“ ideal – das mit Chemiefasern komplett abzubilden, wird kaum gelingen. Aber insgesamt gibt es in der Forschung große Schritte nach vorne. Was noch fehlt, ist die Umsetzung.

Woran hängt es da, beziehungsweise was sind die Hürden und Herausforderungen für die Umsetzung?

Eines der wesentlichen Probleme bei natürlichen Rohstoffen ist die höhere Schwankungsbreite in den Eigenschaften im Vergleich zu Chemiefasern – diese ist natürlich ernte- und wachstumsbedingt. Aber trotzdem ist in den vergangenen Jahren schon viel passiert: In der Autoindustrie hat Mercedes-Benz in einigen Bereichen zum Beispiel auf flachsbasierte Verbundwerkstoffe umgestellt. Ein Nachteil ist allerdings, dass die Verbundwerkstoffe immer noch mit Polypropylen, also synthetischen Materialien auf der Kunststoffseite, hergestellt werden. Der Durchbruch in Richtung eines kompletten biobasierten Verbundwerkstoffs fehlt noch. Im Textilbereich hat sich in den letzten Jahren außerdem viel im Bereich der milch-, also laktatbasierten Fasern getan – diese haben eine wachsende Bedeutung als möglicher Ersatz für klassische Chemiefasern und mittlerweile sehr gute Eigenschaften.

Im technischen Bereich zählt aber letztendlich die Ökonomie, und die behindert gerade den Durchbruch. Viele konservative Herangehensweisen und Vorurteile, zum Beispiel, dass Flachs ausdünstet und das Auto dann nach Heu riecht, sind in vielen Köpfen noch drin.

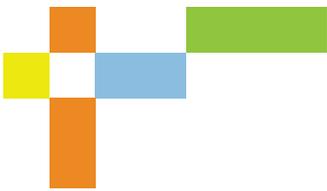
Was wäre denn strukturell notwendig, um da voranzukommen?

Die Gesetzgebung ist auf einer Seite hilfreich: Es wurde zum Beispiel beschlossen, dass auch im Textilbereich die EU-Abfallrichtlinie bis 2025 komplett umzusetzen ist. Das würde ein durchgängiges Recyclinggebot für Bekleidung bedeuten. Die

gesetzlichen Vorgaben werden sicherlich eine Motivation liefern, dass die Kostendifferenz aufgebracht wird. Es gibt aber auf der anderen Seite natürlich auch noch technische Punkte, die bearbeitet werden müssen: Die Datenbasis für die biobasierten Rohstoffe ist noch nicht vollständig. Für die Zukunft wird es außerdem wichtig sein, neue Rohstoffe zu schaffen. Da möchte ich das Beispiel von CO₂-Capture nennen. Wenn ich CO₂ aus der Luft herausfiltere und Kohlenwasserstoff daraus mache, dann habe ich genau die Basis, aus der ich Hochleistungswerkstoffe machen kann – Stichwort Green Carbon! Derzeit wird Kohlenstoff aus Erdöl in aufwendigen, energieintensiven Verfahren hergestellt. Es gibt zwar neue Ansätze, das mit Lignin zu machen, diese Kohlenstoffe sind aber in den Eigenschaften noch nicht gut. Auch gibt es Ansätze, Glycerin aus der Biogasherstellung zu verwenden – das ist dort in ungeheuren Mengen verfügbar – oder eben wirklich aus CO₂-Capture. In Bezug auf die Verbundwerkstoffe wird es auch wichtig sein, ebenfalls die Matrixwerkstoffe aus natürlichen Werkstoffen herzustellen; erst dann hat man wirklich einen voll abbaubaren Rohstoff. Im Moment ist es eine Mogelpackung – es ist häufig Polypropylen und Glasfaser dabei –, das ist nicht konsequent. Aber insgesamt ist ein erhebliches Innovationspotenzial da! Man muss immer berücksichtigen: Textil ist eine der größten Rohstoffquellen, die wir weltweit verarbeiten. Nach Gewicht liegt Stahl natürlich vorne, aber wenn man nach Volumen geht, gibt es keinen Rohstoff auf der Welt, der so viel verarbeitet wird wie Textilien.

Was muss denn passieren, um dieses erhebliche Innovationspotenzial auszuschöpfen?

Wir brauchen ganz klar mehr Forschungsprogramme. Außerdem haben wir nach wie vor das Kostenproblem, das in vielen Punkten einfach ein Skalierungsproblem ist. Bei einem Life-Cycle-Assessment wird man aber feststellen, dass es nur eine Frage des Betrachtungszeitraums ist, in dem sich das rentiert oder nicht. Natürlich ist es zum Beispiel erst einmal billiger, Polypropylen zu verwenden, aber das kann eben nur thermisch recycelt werden, so dass es am Ende wieder Kosten verursacht. Ein weiterer Aspekt zur Materialentwicklung, der mir wichtig ist: Wir müssen die Datenbasis bilden, dass Konstrukteure mit diesen Materialien arbeiten können. Im technischen Bereich hängt es häufig daran, dass diejenigen, die die Produkte entwerfen, nicht die nötige Datenbasis der Kennwerte textiler Produkte oder naturbasierter Fasern haben. Diese Datenbasis brauchen wir, damit wir auch Design daraus machen können. Der Rückschluss ist dann „Design for Recycling“: Ich habe also nicht nur den Rohstoff biobasiert, sondern gestalte auch mein Produkt so, dass eine Wiedergewinnung des Rohstoffs nach der Nutzungsphase möglich ist.



Wie sehen Sie Deutschland im internationalen Vergleich?

Im textilen Bereich haben wir immer noch ein relativ hohes Know-how. Allgemein wird angenommen, dass die Textilindustrie abgewandert ist. Das stimmt in Bezug auf die Bekleidungsindustrie in hohem Maße, weil die wesentlichen Rohstoffe nicht bei uns wachsen. Es gibt kaum noch Webereien und Spinnereien, die Naturstoffe verarbeiten. Aber das Wissen ist immer noch da. Im Textilmaschinenbau ist Deutschland nach wie vor führend, insbesondere wenn es um Prozesse und technische Verfahren geht. Hier gibt es eine Entwicklungskultur und die Industriebasis dazu. Bei technischen Textilien ist Deutschland führend, das wissen die Wenigsten. Wo sind denn technische Textilprodukte, fragt man sich da. Ich sage meinen Studierenden immer, sie mögen sich beispielhaft im Auto

umschauen, um eine große Anzahl von Textilien zu entdecken: den Dachhimmel, den Teppichboden, die Türverkleidung, den Kofferraum, die Geräuschdämmung, den kompletten Sitz, die Sicherheitsgurte etc. Zudem sind der Hygienebereich oder der Straßenbau zu nennen. Auch dort gibt es eine Menge technischer Textilien, und das sind nach wie vor in Deutschland relevante, sehr aktive und innovative Industriezweige. Wir haben auch immer noch sehr viele textile Forschungsinstitute in Deutschland sowie einen weltweit führenden Textilmaschinenbau, führende Verarbeiter und das Know-how für die Faserstoffe. Das Faserinstitut Bremen (in der Anbindung an die Bremer Baumwollbörse) ist nach wie vor global das führende Institut im Bereich der Materialforschung natürlicher Textilien. Auch unser Institut ist weltweit führend bei der Erzeugung von Fasern aus Biopolymeren.

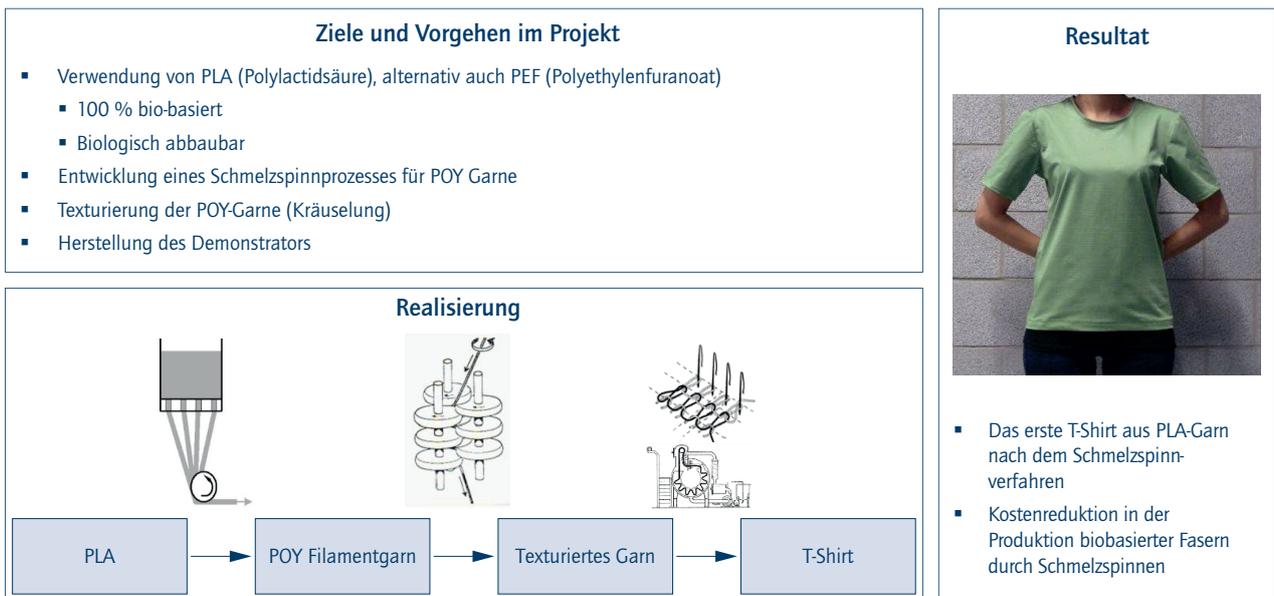


Abbildung 13: Biopolymere der zweiten Generation – Entwicklung der Prozesskette für ein T-Shirt aus Polylactidsäure PLA (Quelle: Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH/RWTH Aachen University)

5 Weiche Robotik⁶²

Prof. Dr. Metin Sitti

Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, Stuttgart

Zwei der großen wissenschaftlichen Herausforderungen der Robotik sind der stabile und effiziente Betrieb von Robotern in komplexen natürlichen Umgebungen sowie die robuste und sichere Interaktion von Robotern mit Menschen. Einer der jüngsten Ansätze, um diese Herausforderungen zu lösen, ist die Entwicklung von Robotern mit ganz oder teilweise weichem Körper, ähnlich den Tieren in der Natur, die weiche Materialien und Strukturen intelligent nutzen. So hat sich die weiche Robotik im letzten Jahrzehnt zu einem neuen Gebiet der Robotik entwickelt, indem sie diese mit Materialwissenschaften und Biologie kombiniert.

Viele neue Fähigkeiten und Funktionen wären für Roboter auf verschiedenen Größenskalen möglich, wenn ihr Design von Tieren mit weichem Körper inspiriert wäre, zum Beispiel von Tintenfischen, Quallen, Raupen und Würmern, oder auch von Pilzen, Schimmelpilzen, Zellen und Mikroorganismen (Amöben, Algen, Bakterien, Spermatozoiden, *C. elegans*⁶³ etc.) oder von tierischen Organen (zum Beispiel dem Elefantenrüssel). Denn einerseits können Roboter mit weichem Körper ihre Formen passiv oder aktiv radikal ändern, um sich an ihre sich dynamisch ändernden, begrenzenden und komplexen Umgebungen anzupassen. Andererseits ermöglichen große, nichtlineare und programmierbare Deformationen des Körpers verschiedenste Fortbewegungsarten und Funktionen, wie beispielsweise Tarnung, was mit starren Robotern nicht möglich ist. Daher können Soft-Robotik-Konstruktionen potenziell eine geringere mechanische und algorithmische Komplexität aufweisen. Schließlich stellen solche Soft-Robotik-Designs eine sichere und robuste Mensch-Roboter-Interaktion bereit, deren Mechanismen so konstruiert werden können, dass sie von Natur aus eine begrenzte Kraftübertragung aufweisen. Dadurch wird eine mögliche Verletzung des menschlichen Körpers selbst im ungünstigsten Fall verhindert.

Das Entwerfen von weichen Robotern besteht derzeit aus zwei Hauptansätzen: Einerseits sind von Tieren inspirierte synthetische weiche Materialien, Mechanismen und Fortbewegungsmethoden für die Herstellung von weichen Robotern im

Gespräch. Bei den weichen Roboter-Fortbewegungssystemen liegt der Schwerpunkt auf von Tintenfischen inspirierten weichen Armen und der entsprechenden Schwimmtechnik, auf von Quallen inspiriertem Schwimmen und von Raupen inspirierten Oberflächen-Kriechrobotern. Diese Roboter werden durch Hydrogele oder Elastomere gesteuert, die auf Reize ansprechen; mögliche Reize für diese weichen Aktuatoren sind Licht, Wärme, elektrische Felder, magnetische Felder, pH-Wert oder Luft- oder Fluidruck. Aktuatoren dieser Art setzen weiche Vorrichtungen in Bewegung, zum Beispiel einen weichen Arm, um eine sanfte Roboterschwimm- oder -kriechbewegung zu erreichen, wobei (kapazitive oder resistive) weiche Sensoren zur Rückkopplungssteuerung integriert werden können.

Magnetisch getriebene „Milliroboter“ können derzeit als fortschrittlichstes weiches Roboter-Fortbewegungssystem angesehen werden. In diese sind magnetische Partikel derart eingebettet, dass sich ein wohldefiniertes Profil der Magnetisierung ergibt: Der Roboter kann über ein externes, in Richtung und Stärke variierendes Magnetfeld angetrieben und gesteuert werden und sieben verschiedene Fortbewegungsarten gleichzeitig ausführen. Die Erforschung dieser Milliroboter ist ein gutes Beispiel dafür, wie bei einem minimalistischen Softroboter eine komplexe dynamische Formprogrammierung vorgenommen werden kann und sich somit ein breites Spektrum äußerst unterschiedlicher Verhaltensweisen des Roboters für verschiedene komplexe natürliche Umgebungen eröffnet.

Beim zweiten Ansatz werden biologisch aktive Zellen wie Muskelzellen (zum Beispiel Kardiomyozyten) oder Mikroorganismen (zum Beispiel Bakterien, Algen) in synthetische weiche Materialien integriert, um weiche Bio-Hybrid-Roboter (biologisch und synthetisch) zu schaffen. Kürzlich wurde ein tintenfisch-ähnlicher Bio-Hybrid-Schwimmroboter mit elektrisch getriebenen mikrostrukturierten Herzmuskel- oder Skelettmuskelzellen realisiert, die an Elastomerstrukturen gebunden sind. Bisher konnten bereits die Aktuation und Fortbewegung solcher Bio-Hybrid-Roboter demonstriert werden.

Softroboter sind für den Einsatz in verschiedensten Anwendungen vorgesehen. Mobile Softroboter sollen künftig in der Medizin Anwendung finden (zum Beispiel wurden bereits weiche medizinische Geräte im Magen-Darm-Trakt und in anderen Regionen des menschlichen Körpers getestet) sowie als Serviceroboter aus aufblasbaren Stoffen zur sicheren Interaktion mit dem Menschen und bei der Überwachung, Erforschung und Regeneration der

62 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

63 | Ein Fadenwurm aus der Gruppe der Rhabditiden.



Umwelt. Solche Roboter gibt es bisher nur als Prototypen, und es wurde noch keine kommerzielle Anwendung realisiert. Zum anderen können mit weichen Robotergreifern komplexe Objekte gehandhabt werden. Vor Kurzem wurden erste Ideen zu neuen weichen Greifern präsentiert, die auf granularen Medien basieren und Partikel in einer elastomeren Haut und eine interne Vakuumsteuerung verwenden. Vorgestellt wurden auch weiche Greifer, mit denen komplexe Objekte robust in 3D manipuliert werden können. Inspiriert waren sie einerseits vom Elefantenrüssel und andererseits von Gecko-Füßen. Gegenwärtig kommerzialisieren mehrere Start-up-Unternehmen in den USA und die Festo GmbH (siehe Kapitel 5.3) aufblasbare Greifer und solche, die mithilfe der Kompaktifizierung granularer Medien funktionieren.

In aktuellen biologisch inspirierten Designs synthetischer mobiler Softroboter konnten bisher nur einfache und noch nicht effiziente Aktuatoren realisiert werden. Zum Beispiel kann die Steifigkeit noch nicht variiert werden. Der Fokus lag bisher zudem nur auf Aktuatoren und Mechanismen zur Fortbewegung. Es besteht ein erheblicher Bedarf an neuen bioinspirierten aktiven Softaktuormaterialien mit hohem Wirkungsgrad und programmierbarer, gerichteter und variabler Steifigkeit. Darüber hinaus stehen noch keine Tools für Computermodellierung und Simulation zur Verfügung, um rigorose und umfassende Designmethoden für weiche Roboter mit nichtlinearem aktivem und passivem Material und Bewegungsverhalten bereitzustellen. Eine weitere Herausforderung ist es, weiche Sensoren in die Soft-Roboter zu integrieren, um eine erweiterte Feedback-Steuerung zu ermöglichen. Außerdem sind die aktuellen einfachen Steuerungsmethoden für weiche Roboter noch nicht robust und anpassungsfähig, da die komplexe Dynamik weicher Roboter, Umgebungsstörungen und Unsicherheiten noch nicht modelliert werden konnten. Schließlich sind zur Realisierung vollweicher Roboter ebenfalls weiche Stromquellen, Rechner und Elektronik notwendig. In diesem Zusammenhang stellte eine Gruppe in Harvard vor Kurzem ein vorläufiges Modell einer Mikrofluidschaltung für weiche elektronische Geräte vor. Bei der Entwicklung von Bio-Hybrid-Softrobotern bestehen viele wissenschaftliche und technische Herausforderungen in Bezug auf die Verbindung von biologischen Zellen mit synthetischen weichen Materialien (zum Beispiel Haftungs- und Biokompatibilitätsprobleme), in Bezug auf die Erreichung komplexerer Funktionen, die nicht nur die Aktivierung und Fortbewegung betreffen, und auf deren Demonstration in realistischen Anwendungen. Bisher gab es noch keine „Killeranwendung“ oder eine Demonstration der Kommerzialisierung im Bereich der weichen Robotik. In

medizinischen Anwendungen müssen Softroboter biokompatibel und sogar biologisch abbaubar sein. Zusätzlich zu den bereits realisierten Fortbewegungsfähigkeiten müssen sie über medizinische Funktionen wie Arzneimittelabgabe, ferngesteuerte Wärmeabgabe, Biopsie-Entnahmen und das Verschließen oder die Freilegung von Gefäßen verfügen. Außerdem ist es notwendig, dass Formänderung und Position in Echtzeit mithilfe von medizinischen Bildgebungsverfahren zur Rückkopplungskontrolle visualisiert werden. Die Integration derart vielfältiger medizinischer Funktionen, die mit medizinischen Bildgebungsverfahren überwacht werden können, stellt eine große Herausforderung für das Feld der Softrobotik dar.

Unverzichtbar sind neue bioinspirierte und biohybride aktive weiche Aktuormaterialien mit hohem Wirkungsgrad und programmierbarer gerichteter und variabler Steifigkeit. Auf flüssigkristallinen Elastomeren (Liquid Crystalline Elastomers – LCEs) basierende weiche Hybridaktuatoren (zum Beispiel magnetische und LCEs, pneumatische und LCEs) sind für solche neuen Aktuormaterialien vielversprechend. Als Nächstes müssen neue Computermodellierungs- und Simulationswerkzeuge für umfassende Designmethoden zum Erstellen von weichen Robotern entwickelt werden. Ferner müssen neue hybride (weiche und starre) Konstruktionen untersucht werden, da komplett weiche Roboter auf großen Skalen nur begrenzte Fähigkeiten und Anwendungsmöglichkeiten haben, insbesondere dort, wo die meisten großen Tiere starre und weiche Materialien in ihren Mechanismen und Körpern kombinieren. In Bezug auf die nichtlineare, komplexe und bisher nicht modellierte Dynamik weicher Roboter sind fortgeschrittene, auf bestärkendem Lernen basierende Steuerungsmethoden erforderlich: Dadurch wird die Dynamik weicher Roboter erst erlernbar und steuerbar, und die Voraussetzung für eine autonome Roboternavigation und Funktionssteuerung wird geschaffen. Schließlich müssen wirkungsvolle reale Anwendungen von weichen Robotern in den Bereichen Medizin, mobile Robotik und Servicerobotik erst demonstriert werden.

Deutschland hat das Potenzial, weltweit eine führende Rolle in der weichen Robotik einzunehmen. Es gibt bereits ein neues Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)⁶⁴ für Soft Robotics, das 2019 gestartet ist und die Forschungstätigkeit auf diesem neuen Gebiet intensivieren soll. Es wäre jedoch zeitgemäßer, die wissenschaftlichen Aktivitäten, Kooperationen und die Sichtbarkeit in diesem Bereich durch größere, beispielsweise von DFG und BMBF geförderte Zentren zu erhöhen, damit risikoreiche und wirkungsvolle Forschungsaktivitäten stattfinden können.

Darüber hinaus ist es unerlässlich, die Gründung neuer Startups auf diesem Gebiet in Deutschland zu unterstützen, um einige der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse in kommerzielle Anwendungen umzusetzen. Erst durch entsprechende Anwendungen lässt sich der reale Einsatz von weichen Robotern demonstrieren und deren gesellschaftliche und industrielle Auswirkungen steigern. Schließlich ist damit zu rechnen, dass medizinische Anwendungen weicher Roboter die größten wissenschaftlichen und sozialen Auswirkungen haben werden. Daher stellt die Unterstützung solcher wissenschaftlichen Forschungs- und Unternehmensgründungsaktivitäten unter Verwendung verschiedener bioinspirierter und biohybrider Materialansätze eine vielversprechende Richtung dar.

Im Folgenden werden zwei Beispiele für weiche Roboter aufgeführt, die von natürlichen Organismen inspiriert wurden. Barbara Mazzolai stellt pflanzeninspirierte Roboter vor (siehe Kapitel 5.1), und Cecilia Laschi (siehe Kapitel 5.2) schreibt über einen weichen Roboter, der in Anlehnung an den Oktopus entwickelt wurde. Das Interview mit einer Vertreterin von Festo, einem der führenden Robotikunternehmen in Deutschland, zeigt das Potenzial von Bioinspiration und die Notwendigkeit einer breiten Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Industriezweigen und Universitäten auf nationaler und internationaler Ebene (siehe Kapitel 5.3).

5.1 Roboter auf der Basis von Pflanzen⁶⁵

Dr. Barbara Mazzolai

Center for Micro-BioRobotics, Istituto Italiano di Tecnologia, Pisa, Italien

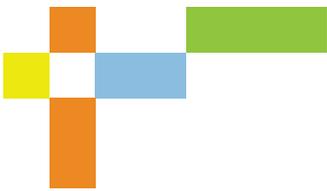
Pflanzen haben mit intelligenten, effektiven und effizienten Anpassungsstrategien erstaunliche Wachstums- und Widerstandsfähigkeiten. Sowohl im Meer als auch an Land sind sie in der Lage, ihre Umgebung zu erfassen und darauf zu reagieren, indem sie ihre Form durch Wachstum an harsche Umweltbedingungen anpassen. Pflanzen verankern sich im Boden und widerstehen so den vielen unvorhersehbaren Kräften, denen sie in verschiedensten Szenarien ausgesetzt sind, wie Wind, Wellen oder etwa einer Schlammlawine. Ihre Umgebung ändert sich kontinuierlich, und ein Überleben wird durch überaus energieeffiziente Anpassungsstrategien gesichert. Aufgrund dieser einzigartigen Eigenschaften werden Pflanzen in jüngster Zeit als Vorbild für die Entwicklung innovativer Technologien und

Systeme in der Robotik genutzt, insbesondere für die Entwicklung sich selbst verändernder, wachsender Roboter, die dank ihrer Fähigkeit, ihren Körper kontinuierlich anzupassen, besser in unstrukturierten und extremen Umgebungen agieren können.

Seit mehr als zehn Jahren untersucht das Zentrum für Micro-BioRobotics des Istituto Italiano di Tecnologia (IIT), wie Pflanzen als lebende Organismen Inspirationen für die Robotik liefern können. Am Anfang widmete sich das Zentrum der Untersuchung von Pflanzenwurzeln mit dem Ziel, autonome Roboter zu entwickeln, die sich durch das Erdreich bewegen können. Diese sogenannten Plantoide sollten beispielsweise terrestrische oder extraterrestrische Böden erkunden und dort Monitoring-Aufgaben übernehmen. Ausgestattet wurden die Roboter mit verteilten Sensoren, Aktoren und dezentralisierter Intelligenz. Tatsächlich sind Wurzeln diejenigen Pflanzenorgane, die für Nahrungssuche und Verankerung zuständig sind. Bei diesem Prozess passen sich Wurzeln, deren Spitzen mit etlichen Sensoren



Abbildung 14: Der PLANTOID-Roboter ist die künstliche Nachbildung einer organischen Pflanze (Quelle: Barbara Mazzolai, Istituto Italiano di Tecnologia, Pisa).



ausgestattet sind und die ihre Umgebung mithilfe von Wurzelhärchen erkunden, ihrer Umwelt ständig an. Sie weichen Hindernissen aus, graben sich in den Boden ein, sammeln gezielt Mineralien und Wasser als essenzielle Lebensbestandteile der Pflanze. Um die Reibung und den hohen Druck im Boden während ihrer Bewegungen zu verringern, wachsen die Wurzeln, indem sie neue Zellen im apikalen Bereich der Wurzelspitzen hinzufügen und dann Wasser aus der Umgebung absorbieren. Auf diese Weise wird nur die Wurzelspitze weiter in den Boden gedrückt, während sich der Rest des Wurzelkörpers nicht bewegt, um den Widerstand zu verringern. Analog dazu lässt der PLANTOID-Roboter (siehe Abbildung 14) seine Wurzeln auf apikaler Ebene wachsen, indem ein additiver Fertigungsprozess verwendet wird, der in die Roboterwurzel eingebettet ist. Ein miniaturisierter 3D-Drucker ermöglicht es dem System, mit neuem Material aus einem Filament Schicht für Schicht nur die Spitze der Roboterwurzel voranzuschieben. Auf diese Weise dringt die Wurzel weiter in den Boden vor, während sie selbst „wächst“. Die Wuchsrichtung wird dabei von externen Stimuli bestimmt, die von integrierten Sensoren erkannt werden.

In jüngerer Zeit hat die Gruppe begonnen, Kletterpflanzen als neues Modell zu betrachten, um inspiriert von deren Fähigkeit, sich durch Wachstum fortzubewegen, einen völlig neuen Ansatz für Bewegung in der Robotik abzuleiten. Viele Kletterpflanzen bilden nur einen dünnen Stamm aus, der alleine mechanisch nicht stark genug ist, um an Höhe zu gewinnen, und der ohne externe Struktur auf dem Boden verbleiben würde. Diese Pflanzen besitzen daher die Fähigkeit, aufwärts zu wachsen, indem sie aktiv Halt suchen und diesen nutzen. Dabei kommen bei den meisten Arten eindrucksvolle Zirkumnutationsbewegungen zum Einsatz, um mit benachbarten Objekten in Kontakt zu kommen und an diesen emporzuklettern. Die neue Generation von kletterpflanzeninspirierten Robotern mit dem Namen GrowBots wird leicht und kleinvolumig sein und mit multifunktionalen Materialien ausgestattet werden, die die Umgebung erfassen und mit ihr interagieren. Sie werden sich selbst verankern, klettern und in Hohlräume vordringen können, wo heutige Kletterroboter, die auf Rädern, Beinen oder Schienen basieren, steckenbleiben oder fallen würden.

Insbesondere die Softrobotik hat das Potenzial, Systeme mit verbesserter Bewegungs- und Anpassungsfähigkeit in unbekanntem und anspruchsvollen Umgebungen zu erzielen. Jenseits der Softrobotik mit vordefinierten Strukturen ist zu erwarten, dass eine neue Klasse pflanzeninspirierter Roboter geschaffen wird, nämlich „wachsende“ Roboter, die ihren eigenen Körper selbst

erschaffen und damit neue Operationen in unstrukturierten und unvorhersehbaren Umgebungen ermöglichen. Die Nachahmung der Fähigkeiten biologischer Systeme, energieeffizient zu sein, die Morphologie zu ändern, den eigenen Körper und dessen Funktionalitäten im Verlauf des Lebens anzupassen und zu erweitern, erweist sich als vielversprechend, um eine völlig neue Robotik für Erkundungs-, Landwirtschafts-, Analyse- oder Notfallszenarien zu entwickeln.

Aus wissenschaftlicher Sicht werden die bioinspirierten Softroboter auch Einfluss auf ein besseres Verständnis pflanzenwissenschaftlicher Aspekte haben. Die Generation von „Robotern für die Biologie“ basierend auf spezifischen Pflanzenmerkmalen kann Einblicke in die Biologie der Organismen selbst geben und es ermöglichen, die Grundlagen komplexer biologischer Verhaltensweisen zu erforschen. Ein Roboter bietet in der Tat den Vorteil, programmierbar und rekonfigurierbar zu sein, sodass verschiedene Hypothesen getestet werden können. Neben Softwaresimulationen kann ein Roboter dazu beitragen, das Verhalten biologischer Systeme zu erforschen, indem die Fähigkeiten direkt in der realen Welt getestet werden können. Dieser Brückenschlag zwischen Robotik und Biologie wird dazu beitragen, die fundamentale und aufstrebende Bedeutung der Robotik in den nächsten Jahrzehnten zu festigen und neue spannende Möglichkeiten in Wissenschaft und Technik zu eröffnen.

5.2 Wie der Oktopus die weiche Robotik inspiriert⁶⁶

Prof. Dr. Cecilia Laschi

BioRobotics Institute, Sant'Anna School of Advanced Studies, Pisa, Italien

Schauen Sie sich einen Tintenfisch mit den Augen eines Robotikers an: Er hat einen weichen Körper, seine Arme sind beweglich und verformbar, sie können sich in jede Richtung und an jedem Punkt entlang der Tentakeln biegen. Bei Bedarf können sie sich aber auch versteifen und Gegenstände mit beachtlicher Kraft greifen und ziehen. Diese Vielzahl möglicher Bewegungsmuster wird vom Tier elegant und ohne erkennbare Anstrengung gesteuert.

Trotz des raschen Fortschritts der Robotertechnologien und des heute vielfach diskutierten enormen Potenzials für eine umfangreiche Einführung von Robotern in unser tägliches Leben

66 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

standen die Materialien, aus denen Roboter gebaut sind, bisher nicht im Mittelpunkt der Roboterforschung. Die meisten Robotertheorien und -techniken basieren auf Stanggelenkrobotern, die außergewöhnliche Genauigkeit, Geschwindigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit an den Tag legen und heutzutage hauptsächlich in der Fertigung eingesetzt werden. Die sogenannten Serviceroboter, die mit natürlichen Umgebungen unseres täglichen Lebens umgehen können, ringen immer noch darum, genauso effektiv zu sein und einen vergleichbaren Marktanteil wie Fertigungsroboter zu erreichen.

Der Oktopus kann einen anderen Ansatz aufzeigen, bei dem der Fokus auf der Erforschung der Materialien und insbesondere deren variabler Steifigkeit liegt. Durch das Verständnis seines geschmeidigen und geschickten Bewegungsmusters und durch das Nachahmen weniger Schlüsselprinzipien wurde ein achtarmiger Roboter mit weichem Körper gebaut, der im Wasser kriechen und Objekte mit festen Greifern aufnehmen kann. Dieser tintenfischähnliche Roboter ist ein gutes Beispiel dafür, dass weiche Roboter und verwandte Technologien realisierbar sind. Sein Beitrag besteht jedoch insbesondere darin, Roboter-materialien in den Forschungsfokus zu stellen und auf die Rolle weicher Materialien zur Verbesserung der Fähigkeiten von Robotern in realen Anwendungen aufmerksam zu machen.

Derzeit gibt es eine bedeutende Gemeinschaft von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich mit der weichen Robotik befassen. Dabei stehen sie nicht nur vor den zahlreichen interdisziplinären Herausforderungen beim Bau von Soft-Robotik-Komponenten und -Systemen, sondern konzentrieren sich auch auf geeignete Anwendungen im biomedizinischen Bereich, bei der Geländeerkundung und sogar in der Fertigung.



Abbildung 15: Prototyp eines tintenfischähnlichen Roboterarms zusammen mit seinem Vorbild, einem Tintenfisch (Quelle: Massimo Brega)

5.3 Interview Karoline von Häfen, Firma Festo AG & Co. KG

Karoline von Häfen ist Designerin und Head of Corporate Bionic Projects bei der Festo AG & Co. KG. Ihre Haupt-tätigkeiten liegen im konzeptionellen Design und in der Projektleitung im Bionic Learning Network. Das Bionic Learning Network, ein Verbund von Festo mit namhaften Hochschulen, Instituten und Entwicklungsfirmen, liefert neue Impulse für technische Anwendungen und die industrielle Praxis, die von der Natur inspiriert sind.

Frau von Häfen, was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in den Material- und Werkstoffwissenschaften in den letzten Jahren?

Auch wenn es nicht so viel mit meiner eigenen Arbeit zu tun hat, finde ich das Thema 3D-Druck von Organen faszinierend. Es ist unglaublich, dass man so etwas Komplexes wie ein menschliches Organ einfach drucken kann. Da kommt par excellence zusammen, was man von der Natur lernen und in die Technik übertragen kann, um es dann zu einem großen humanen Nutzen einzusetzen.

Wie schätzen Sie im Allgemeinen das Innovationspotenzial von Wissen ein, das aus der Natur abgeleitet wird?

Das kann man gar nicht hoch genug einschätzen. In unserem Gebiet der Bionik sind die Kernfragen: Was können wir von der

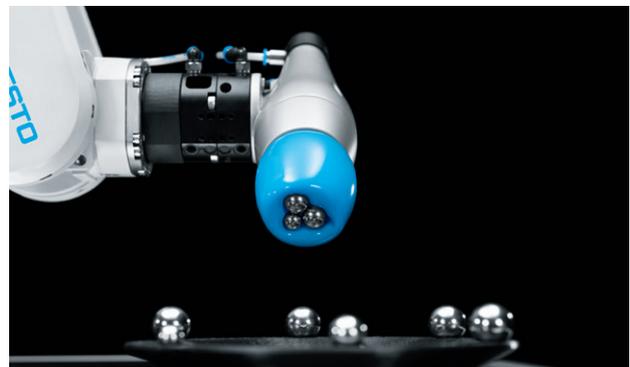
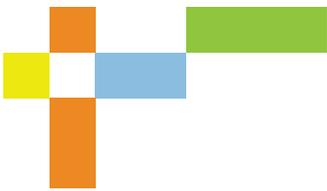


Abbildung 16: Der von der Chamäleon-Zunge inspirierte FlexShapeGripper kann unterschiedlichste Objekte formschlüssig greifen (Quelle und Copyright: Festo AG & Co. KG, alle Rechte vorbehalten).



Natur lernen? Welche spannenden Prinzipien finden wir vor, die wir umsetzen wollen? Die Natur hat eine Fülle an Ideen und Lösungen verschiedenster Aufgaben und Problemstellungen parat, denen man sich noch gar nicht gestellt hat. Allerdings gelingt uns vieles auch schon: Wir haben beispielsweise den Vogelflug entschlüsselt. Der Mensch kommt natürlich nie ans Original heran – da ist uns die Natur um Längen voraus. Die Natur ist ein endloser Fundus an neuen Ideen. Es ist viel einfacher, sich dort etwas abzugucken, als sich selbst Neues auszudenken. Denn alles ist schon evolutionserprobt, die Fehler sind beseitigt – dem liegt ein immens langer Entwicklungsprozess zugrunde.

Möchten Sie einen konkreten Anwendungsfall schildern, bei dem es um Materialentwicklung in Ihrer Firma geht?

Wir haben uns im vergangenen Jahr den Flughund beziehungsweise konkret seine Haut angeschaut. Dessen Haut muss dehnbar wie ein Gummituch, aber gleichzeitig extrem leicht sein, ein Zusatzgewicht würde den Flughund nicht abheben lassen. Uns ist eine tolle Kombination gelungen, die genau diese Eigenschaften erfüllt. Und das kam aus der Anforderung: Wenn das Material nicht elastisch ist, fliegt der Flughund nicht, und wenn es nicht leicht ist, fliegt er auch nicht. Dieses Material ist allerdings noch nicht in der marktreifen Anwendung.

Haben Sie auch ein Beispiel, das Sie sich in der Natur angeschaut haben und wofür Sie später eine Anwendung gefunden haben?

Ja, die Zunge des Chamäleons: Die klebt einerseits und hat andererseits eine Spitze, die sich um ein Beutetier herumstülpen kann, sodass es festgehalten wird. Das hat uns interessiert, weil wir in der Automation auch Dinge greifen und festhalten müssen. Wir haben den Greifer als Prototyp vor vier Jahren auf der Hannover Messe vorgestellt. Seit diesem Jahr ist er als Serienprodukt auf dem Markt (siehe Abbildung 16). Neben der Greiffunktion der Zunge war auch das Werkstoffthema in diesem Zusammenhang interessant: Wir haben diese Zunge in eine silikonartige, tulpenförmige Greiferspitze übersetzt, die zwar unpräzise, aber verschiedenste Objekte auch gleichzeitig und ohne Sensorik greifen kann.

Sehen Sie denn große Hürden oder Herausforderungen für die Entwicklung und Umsetzung von bioinspirierten Materialien?

Ich denke da jetzt in eine etwas andere Richtung, die Künstliche Intelligenz. Das Thema „Bestärkendes Lernen“ ist auch von der Natur abgeguckt, also das Lernen durch Bestätigung und

Belohnung. Nur: Wie belohnt man eine Maschine? Über einen Algorithmus, aber das Prinzip ist das gleiche. Und da gibt es schon Ängste, ob etwa die Maschinen unsere Aufgaben übernehmen werden und der Mensch ausgedient hat. Da ist man gut beraten, die Technik gerade für die Menschen unterstützend nutzbar zu machen und ihnen das auch klar zu kommunizieren.

Was würden Sie sich wünschen, damit es mit den bioinspirierten Materialien vorangeht?

Man kann gute Ideen und Innovationen nicht oft genug teilen. Das ist ein Prinzip, das wir in unserem Bionic Learning Network anwenden, in dem wir mit vielen Partnern zusammenarbeiten, auch international. Wir haben viele Ideen und setzen in der Umsetzung unter anderem bei Werkstoffen oder Konstruktionsprinzipien auf Kooperationen mit Hochschulen und anderen Firmen. Dadurch haben wir die Möglichkeit, immer wieder etwas Neues zu machen und in großen Schritten voranzukommen – sodass man nicht im eigenen Saft schmort. Viele Impulse kommen von außen: So profitieren die Industrie, die Hochschulen und die Studierenden auch.

Denken Sie, dass ein Produkt aus dem angesprochenen Bereich länger braucht, um auf den Markt zu kommen, beziehungsweise sind die Herausforderungen andere?

Also, das ist schon ein bisschen anders gelagert. In der Regel werden Produkte beziehungsweise deren Bedarf vom Markt abgeleitet. Was gibt es für Bedürfnisse der Kunden? Wo gibt es Anwendungen, wo es noch keine Lösung gibt? Wenn wir aber von der Natur lernen, steht nicht im Fokus, was ein Kundenbedürfnis sein könnte, sondern da steht im Vordergrund: Was gibt es hier Interessantes zu lernen? Wenn man dann etwas Interessantes gelernt hat, ist die große Frage: Wie passt das jetzt zu den Bedürfnissen? Man kommt also von der Lösung her und sucht sich dann das Problem – das ist ein ganz anderer Ansatz.

Haben Sie denn eine Idee, wie man ein besseres Umfeld dafür schaffen könnte, einen solchen Paradigmenwechsel oder eine neue Denkweise herbeizuführen?

Denkweise ist hier das richtige Stichwort. Es mangelt ja nicht an Ideen und Ansätzen. Vielleicht braucht es größere Freiräume, damit das rein mechanistische Abarbeiten von Produktaufträgen aufhört, aber ein Unternehmen muss auch wirtschaftlich sein. Wir haben eine gute Hochschul- und Forschungslandschaft, da sind gute Voraussetzungen gegeben.

6 Bioinspirierte Energiematerialien

Prof. Dr. Martin Möller

Leibniz-Institut für Interaktive Materialien, Aachen

Vielleicht ist die Frage der Energieumwandlung und Energiespeicherung das herausforderndste Zukunftsthema bei der Biologisierung der Materialwissenschaften. Es ist sicherlich auch eine Aufgabe, für die der ökologische Anspruch und die heutige Realisierung am weitesten auseinandergehen. Was immer wir tun werden, um eine Technologie im Einklang mit der Natur zu entwickeln, sie wird davon abhängen, dass wir in ausreichender Menge regenerative Energie zur Verfügung haben, um einerseits die wachsenden Bedürfnisse der Menschen erfüllen zu können und andererseits eine saubere oder grüne Technologie zu ermöglichen. So ist auch eine zukünftige, perfekt funktionierende Kreislaufwirtschaft nicht ohne einen ausreichenden Energieeinsatz möglich. Mit anderen Worten: Das Sparen von Energie und die Entwicklung energieeffizienter Prozesse können nicht ersetzen, dass wir uns in der Zukunft um neue regenerative Energiequellen bemühen müssen.

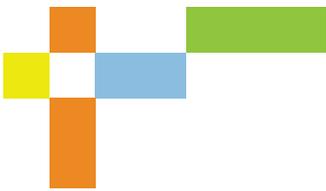
Im Grunde kennen wir nur drei Quellen: chemische Energie, Licht und Wärme sowie gespeicherte elektrische Energie. Alle gehen zurück auf die Einstrahlung der Sonne. Wenn wir heute etwa achtzig Prozent des weltweiten Energiebedarfs aus fossilen Quellen decken, dann ist das Sonnenenergie, die als chemische Energie im Laufe der Erdgeschichte in Form von Kohle, Öl und Gas gespeichert wurde. Sonnenlicht und die dadurch erzeugte Erwärmung sind der Antrieb für Wind- und Wasserenergie. Elektrische Energie erzeugen wir aus diesen Quellen auf Umwegen oder direkt über die Photovoltaik.

Wenn das Sonnenlicht die primäre Energiequelle der Erde ist, so stellt sich erstens die Frage, ob diese Quelle ausreichend ist, und zweitens, warum wir sie nicht stärker nutzen. Die erste Frage ist einfach zu beantworten: Die Strahlungsenergie, die am Erdboden ankommt, kann bei klarem Himmel eine Leistung von 1.000 Watt pro Quadratmeter erreichen und an trübten Wintertagen auf 50 Watt pro Quadratmeter absinken. Daraus ergibt sich für Deutschland ein jährlicher Energieeintrag von 1.000 Kilowattstunden pro Quadratmeter, für die Sahara ein Wert von 2.200 Kilowattstunden pro Quadratmeter. Die Zahlen zeigen, dass die Energieeinstrahlung der Sonne den Energiebedarf der

Menschen auch für alle Anforderungen einer „grünen“ Technologie um mehr als vier Größenordnungen übersteigt. Damit liegt ein großer Nachdruck auf der zweiten Frage, warum wir Sonnenlicht als Energiequelle nicht direkt und vor allem viel stärker nutzen. Wenn man von den heute noch dominierenden Faktoren absieht, etwa der fehlenden Infrastruktur, die nicht nur hohe Investitionskosten, sondern auch lange Entwicklungszeiten erfordert, politischen Unsicherheiten in den besonders sonnenreichen Regionen der Erde und der Wettbewerbsfähigkeit zu den fossilen Energiequellen, dann bleiben zwei technische Argumente, auf die in dieser Studie eingegangen werden soll. Das sind zum einen die vergleichsweise geringe Effizienz, mit der das Licht gesammelt und in eine technisch verwertbare Energie wie Wärme oder Elektrizität umgewandelt werden kann, und zum anderen die begrenzten Möglichkeiten, die geerntete Energie zu speichern, sodass sie zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung gestellt werden kann.

Die direkte Nutzung von Licht für das Leben erfolgt über die Photosynthese von Pflanzen, Bakterien und Algen. Auch dieser Prozess ist wenig effektiv. Nicht einmal vier Prozent der Lichtenergie werden in chemische Energie umgewandelt. Bereits heute ermöglicht aber die synthetische Biologie über künstliche, aber komplett biologische Stoffwechselwege die chemische Bindung von Kohlendioxid aus der Luft mit einer gegenüber der pflanzlichen Photosynthese um zwanzig Prozent höheren Effizienz. Noch größere Sprünge werden durch die Kombination der Photovoltaik mit Power-to-X-Verfahren eröffnet. Dabei richtet sich die Power-to-X-Forschung schwerpunktmäßig auf die Entwicklung effizienter Anlagen und eine schnelle Markteinführung. Stefan Buchholz weist in seinem Interview (siehe Kapitel 6.5) auf das Evonik-Projekt hin, in dem Strom aus erneuerbaren Quellen für einen Elektrolyseprozess in Kombination mit einer mikrobiologischen Fermentation genutzt wird, um Butanol und Hexanol als wichtige chemische Grundstoffe über eine biohybride Photosynthese zu erzeugen.

Eine ganz andere Perspektive ergibt sich, wenn die Materialien als Systemkomponenten selbst zum Energiesammler werden. Hier sind Integration und Dezentralisierung das Vorbild aus der Natur. Die Energie wird von außen in Form von Licht und nicht mehr unbedingt über elektrische Anschlüsse oder als mechanische Energie zugeführt. Ein Beispiel sind die von Marc-Denis Weitze angesprochenen „künstlichen Blätter“, die Lichtabsorption und Hydrolyse integrieren (siehe Kapitel 6.2). Andere Beispiele wurden bereits von Metin Sitti zur weichen Robotik angesprochen (siehe Kapitel 5). Vor dem Hintergrund, dass Sonnenlicht die am einfachsten verfügbare natürliche



Energiequelle ist, diskutieren die Beiträge von Karl Leo und Marc-Denis Weitze das große Potenzial und die Herausforderungen der künstlichen Photosynthese (siehe Kapitel 6.1 und 6.2). Eine besondere Rolle kommt hier den organischen Photovoltaik-Elementen zu: Sie ermöglichen nicht nur molekülbasierte transparente und flexible Solarzellen, sondern können auch als Systemkomponenten mit anderen Kunststoffen verbunden werden. Eine besondere Herausforderung für die direkte Nutzung von Licht als Energiequelle sind die Lichtführung und die Einkopplung über einen breiten oder auch einen gewählten Wellenlängenbereich. Hier zeigen die Beiträge von Cordt Zollfrank sowie von Richard M. Parker und Silvia Vignolini das Potenzial des natürlichen nachwachsenden Rohstoffs Zellulose für photonische Pigmente und multimodale photonische Kristalle (siehe Kapitel 6.3 und 6.4).

6.1 Licht als Energiequelle in der Materialentwicklung

Prof. Dr. Karl Leo

Dresden Integrated Center for Applied Physics and Photonic Materials, Technische Universität Dresden

Die Erfassung und Umwandlung von Sonnenenergie in Brennstoffe und Rohstoffe ist eine globale Herausforderung. Für Gewinnung, Speicherung und Transport von Energie werden Materialien und Bauelementkonzepte benötigt, die spezielle Funktionen erfüllen, wie zum Beispiel Absorption von Licht, Erzeugung und Transport von Ladungsträgern in Solarzellen oder Speicherung und Transport von Ionen in Akkumulatoren. Die Biologie hat in Hunderten von Millionen Jahren mithilfe der Evolution für verwandte Probleme eine Fülle von Strategien entwickelt, die zum Teil komplexe Funktionen in oft sehr eleganter Weise erfüllen.

Ein Beispiel für eine solche von der Natur gefundene Lösung ist die Photosynthese. Hier wird durch die Absorption von Licht direkt ein chemischer Brennstoff erzeugt, ohne dass weitere Umwandlungsschritte notwendig sind. Die Prozesse in diesen photosynthetischen Systemen sind extrem komplex, konnten aber in den vergangenen Jahrzehnten zunehmend gut verstanden werden. Abbildung 17 zeigt exemplarisch das Schema einer solchen photosynthetischen Reaktion: Hier werden auf äußerst elegante Weise mehrere Photonen absorbiert und die Energie über eine Vielzahl von molekularen Komplexen transportiert, um ein energiereiches Molekül zu erzeugen. Neben

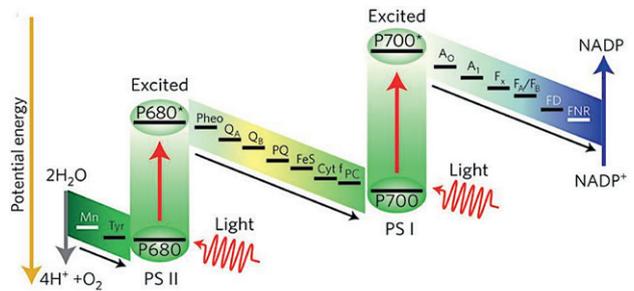


Abbildung 17: Reaktionsschema des Photosystems II zur Umsetzung von Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat+ (NADP+) zu NADP durch Absorption mehrerer Photonen in den P680- und P700-Pigmenten (Quelle: Tachibana et al. 2012)

diesem Beispiel, dessen Prinzip die künstliche Photosynthese inspirieren kann, gibt es eine Vielzahl weiterer Ansätze in der Biologie, die für technisch relevante Materialien und Systeme, wie Energy Harvesting Living Materials, Piezoeffekte, zellulosebasierte Lichtleitersysteme, photokatalytische Reaktionen, bioinspirierte optische Kristalle und photosynthetische Folien, Anregungen bieten könnten.

Um die biologischen Lösungen in reale Anwendungen zu überführen, sind allerdings oft hohe Hürden zu überwinden. Dies hat bisher verhindert, dass bioinspirierte Strategien eine breite praktische Anwendung gefunden haben. Ein Aspekt ist hierbei, dass die Natur oft ganz andere Wege geht als die Technik: Die Natur ist im Rahmen der Evolution auf das Überleben eines Systems optimiert, nicht auf die Effizienz. So bleibt etwa die Energiegewinnung durch Photosynthese bezüglich der erzeugten Energie pro Flächeneinheit deutlich hinter der Photovoltaik zurück.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen Natur und Technik ist, dass die natürlichen Prozesse fast alle in wässriger Lösung stattfinden, was in der Technik in vielen Fällen nicht möglich ist. Außerdem hat die Natur ausgeklügelte Reparaturmechanismen etabliert, die es erlauben, Schäden am System zu tolerieren, da sie ständig repariert oder regelmäßig erneuert werden, wie zum Beispiel Blätter an Bäumen. Solche Ansätze sind in der konventionellen Energietechnik nicht bekannt; ihre Umsetzung erfordert Offenheit für gänzlich neue Wege.

Um das Potenzial bioinspirierter Energietechnologien stärker ausnutzen zu können, sind zunächst umfangreiche weitere Forschungsarbeiten nötig, um die mikroskopischen Mechanismen der Natur möglichst vollständig zu verstehen. Darüber

hinaus bedarf es breiter interdisziplinärer Anstrengungen, um für ausgewählte Probleme konkrete Anwendungen für bioinspirierte Systeme zu erreichen.

Ein Beispiel, das vergleichsweise einfach umzusetzen wäre, ist das rationale Design von Molekülen und Materialien, zum Beispiel für die Katalyse: Enzyme katalysieren Multielektronreaktionen und erleichtern chemische Transformationen, die künstlich hergestellte Katalysatoren noch nicht effizient umsetzen. Ein anderes Beispiel wäre die organische Photovoltaik: Konzepte, die aus photosynthetischen Antennenkomplexen bekannt sind, könnten Hinweise dazu liefern, wie der Transport der exzitonischen Anregung über lange Strecken hin zur photovoltaischen aktiven Grenzfläche optimiert werden kann.

Die langfristige Vision sollte sicherlich sein, auch komplexe biologisch inspirierte Systeme zu realisieren. Ein herausragendes Beispiel wäre sicherlich ein künstliches photosynthetisches Modul, das kontinuierlich, mit hoher Effizienz und langer Lebensdauer einen leicht speicherbaren und transportablen Energieträger erzeugt.

6.2 Katalysatoren für die Künstliche Photosynthese

Dr. Marc-Denis Weitze
acatech Geschäftsstelle

Die Wissenschaftsakademien definieren: „Die Künstliche Photosynthese dient der Produktion chemischer Energieträger und Wertstoffe unter Verwendung von Sonnenlicht als einziger Energiequelle in integrierten Apparaten und Anlagen. Die besondere Stärke des Ansatzes liegt dabei in der Bereitstellung von erneuerbarer Energie in stofflich gespeicherter sowie lager- und transportierbarer Form. Hierfür wird ein zentrales Prinzip des biologischen Vorbilds nachgeahmt: die Kopplung von lichtinduzierten Ladungstrennungen mit katalytischen Prozessen für die Produktion energiereicher Verbindungen.“⁶⁷

So groß das Potenzial der Nutzung von Sonnenenergie ist, so groß sind bis heute jedoch auch die damit verbundenen wissenschaftlich-technischen Herausforderungen. Es geht in der aktuellen

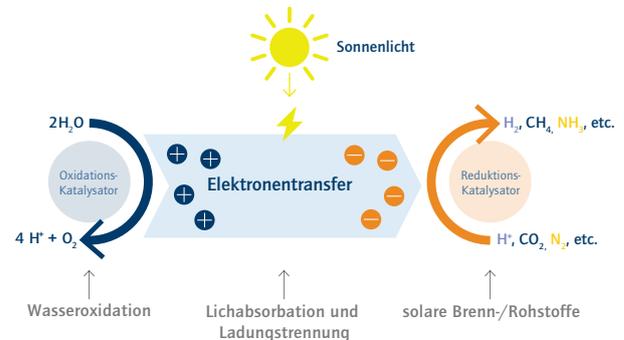


Abbildung 18: Teilprozesse der Künstlichen Photosynthese im Überblick (Quelle: acatech et al. 2018)

Forschung aber weniger um eine Optimierung des biologischen Systems als vielmehr um eine Inspiration durch Biologie,⁶⁸ die durch katalytische Systeme umgesetzt werden soll.

Wie in Abbildung 18 gezeigt, sind die Ausgangsprozesse der Photosynthese Lichtabsorption und Ladungstrennung. In künstlichen Systemen können diese über lichtabsorbierende Pigmentmoleküle oder durch Festkörper (Photovoltaik, meist mit Halbleitern) erfolgen. Allerdings sind viele Pigmentmoleküle für einen Einsatz in Katalyse-Systemen noch nicht ausreichend stabil, insbesondere in wässriger Lösung.⁶⁹

Insbesondere bei der Protonenreduktion sind Anstrengungen in der Katalysatorentwicklung nötig, um die bereits bekannten edelmetallfreien Verbindungen noch effizienter, haltbarer und reaktionsfreudiger zu machen.⁷⁰ Ein typisches System zur elektrokatalytischen CO₂-Reduktion enthält eine wasseroxidierende Katalysatorelektrode sowie eine Elektrode zur CO₂-Reduktion. Welche Produkte entstehen, hängt hier insbesondere vom Katalysatormaterial ab.

Lichtabsorption und Elektrochemie können auch kombiniert werden, indem die elektrochemische Reaktion direkt auf der Oberfläche des lichtabsorbierenden Halbleiters erfolgt (Abbildung 19).⁷¹ Obwohl einige vielversprechende Materialien für solche Zellen bereits seit vielen Jahren bekannt sind, erfüllt bislang keines davon alle Anforderungen für einen technischen Einsatz. Derzeit werden in der Forschung zwei Routen verfolgt, um die Limitierungen der bekannten Halbleitermaterialien für Photoelektroden zu überwinden. Zum einen wird nach völlig

67 | Siehe acatech et al. 2018, S. 9.

68 | Vgl. Dau et al. 2019.

69 | Vgl. acatech et al. 2018.

70 | Vgl. Ebd.

71 | Vgl. Ebd.

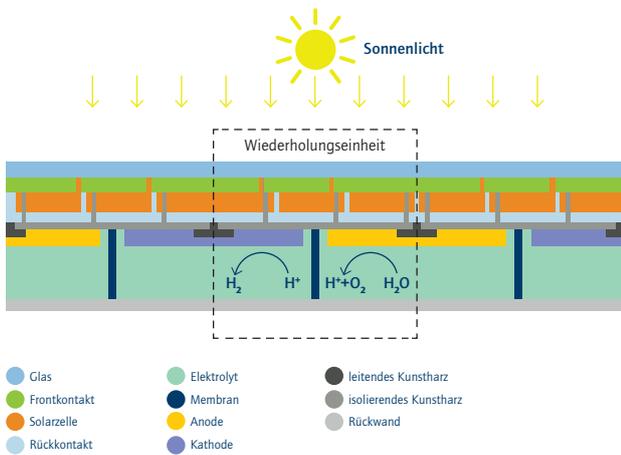


Abbildung 19: Integriertes System zur photoelektrochemischen Wasserspaltung (Quelle: acatech et al. 2018, Darstellung nach FZ Jülich)

neuen Materialien mit geeigneten Bandlücken und guter chemischer Stabilität gesucht, zum anderen werden verschiedene bereits bekannte Materialien kombiniert, um den gewünschten Eigenschaften näherzukommen.

Das Wissen um die Prozesse an den Oberflächen von Halbleitermaterialien, die mit Schutz- oder Katalysatorschichten überzogen wurden, konnte in den letzten Jahren enorm erweitert werden. Dies wird beispielsweise am kürzlich entwickelten Konzept adaptiver Grenzflächen deutlich. Dabei handelt es sich um Kontakte, die sich grundsätzlich sowohl von herkömmlichen Halbleiter-Elektrolyt-Grenzflächen als auch von „verpackten“ photovoltaischen Kontakten darin unterscheiden, dass ihre Eigenschaften vom Redoxzustand der darauf aufgebracht Katalysatorschicht beeinflusst werden. Für ein detailliertes Verständnis und eine verbesserte Herstellung solcher adaptiven Grenzflächen bedarf es allerdings noch intensiver Untersuchungen. Diese werden auch die Entwicklung neuer Untersuchungsmethoden erfordern, wie zum Beispiel Röntgenspektroskopie- oder Elektronenmikroskopie-Messungen während der Photoelektrokatalyse.⁷²

Die Systeme der Künstlichen Photosynthese mit dem derzeit höchsten Integrationsgrad sind die sogenannten künstlichen Blätter. Sie kombinieren alle lichtabsorbierenden Materialien und katalytischen Zentren in einem einzigen, zum Teil papierdünnen Bauteil, ohne dass externe Drähte benötigt werden, um

Teilsysteme zu verbinden. Prototypen, die auf ionendurchlässigen Membranen basieren, in denen Lichtabsorber und katalytische Zentren direkt integriert sind, wurden vom amerikanischen Konsortium des Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP) bereits vorgestellt.⁷³

Bei hybriden photosynthetischen Systemen schließlich handelt es sich um die Kopplung von biologischen mit nicht-biologischen Komponenten. Die Kombination von Elektrolyse und Fermentation überführen derzeit die Unternehmen Siemens und Evonik in eine Versuchsanlage, in der zunächst Wasserstoff und Kohlenmonoxid elektrolytisch hergestellt werden (mit der oben beschriebenen CO₂-Elektrolyse). Im nächsten Schritt werden diese Gase zu Essigsäure und Ethanol fermentiert und in weiteren Fermentationsschritten in Butanol und Hexanol umgewandelt.⁷⁴

In vielen Ländern weltweit wird die Vision der Künstlichen Photosynthese verfolgt – ähnlich wie die Mondlandung vor einem halben Jahrhundert ist sie ein Sehnsuchtsziel der Wissenschaft. Die Entwicklung und Entdeckung geeigneter Katalysatormaterialien steht derzeit im Zentrum der Aufmerksamkeit.

6.3 Optische Materialien aus Zellulose⁷⁵

Prof. Dr. Cordt Zollfrank
TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit (TUMCS), Technische Universität München

Zellulose ist das am häufigsten vorkommende Biopolymer der Welt und die Hauptstrukturkomponente in der Zellwand höherentwickelter Pflanzen und Algen. Die Herstellung aus nachhaltigen Ressourcen (Lignozellulose, Algen, Bakterien) liefert ein kostengünstiges umweltverträgliches Biopolymer, das in großen Mengen und mit hervorragenden einstellbaren und maßgeschneiderten Eigenschaften zu erzielen ist. Zellulose ist ein Homopolysaccharid, bei dem Anhydroglucoseeinheiten über β(1→4)-glykosidische Bindungen miteinander verknüpft sind. Die Zelluloseketten setzen sich über ausgedehnte und variable inter- und intramolekulare Wasserstoffbrücken zu faserigen Strukturen zusammen, die zu einer Vielzahl von Kristallstrukturen und selbstassemblierten supramolekularen Architekturen führen. In der Natur wird die Farbgebung normalerweise mithilfe

72 | Vgl. acatech et al. 2018..

73 | Vgl. Ebd.

74 | Vgl. Haas et al. 2018.

75 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

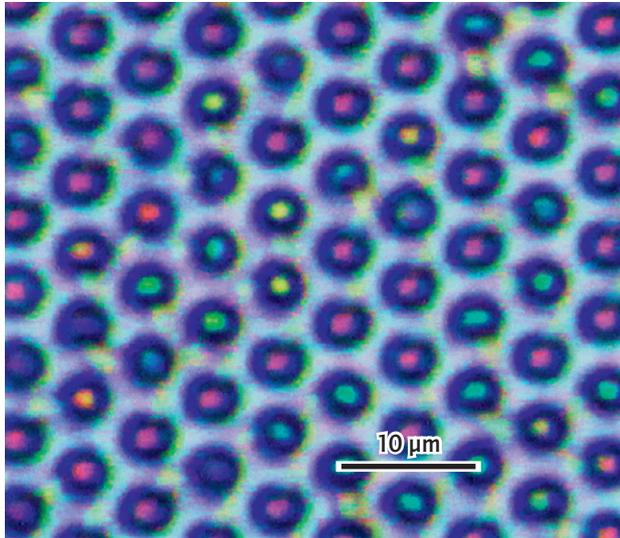


Abbildung 20: Transparente, oberflächenstrukturierte Filme aus Zellulose mit individueller Farbgebung in jedem Zellulose ring (flächige Hintergrundbeleuchtung). Diese Arten von strukturierten Materialien können als analytische optische Mehrkanalsensoren oder Abbildungsvorrichtungen verwendet werden (Quelle: Daniel Van Opdenbosch, TUM).

von Strukturen auf Biopolymerbasis (Proteinen und/oder Polysacchariden) erzeugt, und die einzigartigen optischen (allgemein funktionalen) Eigenschaften natürlicher Systeme werden durch die Wahl einer eindeutigen, oft komplexen Struktur erreicht. Die einzelnen Biopolymere haben typischerweise niedrige Brechungsindizes. Ein ausschlaggebender Parameter für optische und photonische Anwendungen ist der Brechungsindexkontrast zwischen den verwendeten Materialien und Strukturen. Der Brechungsindex von Zellulosefasern liegt zwischen 1,48 und 1,55, was für einen ausreichenden Kontrast sorgt, zum Beispiel zur umgebenden Luft, um durch geordnete und ungeordnete Strukturierung eine Vielzahl strahlender Strukturfarben zu erzeugen. Derzeit bietet das künstliche Engineering von photonischen Architekturen auf Biopolymerbasis aufgrund der niedrigen Brechungsindizes nur sehr wenige Möglichkeiten; aber es ist möglich, die strukturelle Anordnung der Zellulose zu verwenden, um künstlich bioinspirierte Vorrichtungen durch Selbstassemblierung zu konstruieren. Außerdem kann das Auflösen von Zellulose in verschiedenen nicht-derivatisierenden Lösungsmitteln für die Herstellung unterschiedlichster Strukturen nützlich sein (Fasern, Gele und Membranen). Diese Zelluloselösungen sind unter anderem bei Techniken zur Oberflächenstrukturierung einsetzbar, zum Beispiel bei der

Prägelithografie weicher Materialien. Auch transparente, oberflächenstrukturierte Zellulosefilme mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften sind möglich. Insgesamt sind also zellulosebasierte Materialsysteme für fortgeschrittene Anwendungen sehr vielversprechend. Optische Fasern und Wellenleiter, die ausschließlich aus Zellulose bestehen, existieren bisher nicht, werden jedoch für das Management von Photonen und die optische Informationsübertragung von Bedeutung sein. Zellulose ist ein Material mit großem Potenzial in der optischen Technik mit einer nachhaltigen Verfügbarkeit und vorteilhaften, umweltverträglichen Eigenschaften.

6.4 Natürliche Farbstoffe aus Zellulose⁷⁶

Dr. Richard M. Parker und Dr. Silvia Vignolini
 Department of Chemistry, University of Cambridge,
 Cambridge, UK

Farbstoffe werden vielfältig in der Industrie verwendet, von Lebensmitteln und Kosmetika bis hin zu Textilien und Anstrichen, wo sie nicht nur die Ästhetik bereichern, sondern auch als Maß für Qualität, Attraktivität, Frische oder Geschmack dienen. Während die Pigmentindustrie seit Langem auf die Verwendung komplexer synthetischer Farbstoffe oder anorganischer Partikel angewiesen ist, um Farben und visuelle Effekte zu erzielen, besteht eine wachsende Nachfrage nach natürlicheren oder nachhaltigeren Alternativen, welche die wachsenden Bedenken hinsichtlich möglicher langfristiger gesundheitlicher Auswirkungen ausräumen.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, kann man sich von der Natur inspirieren lassen, um sowohl nachhaltige Biomaterialien als auch anwendbare Strategien zu identifizieren. Von besonderem Interesse ist dabei die „strukturelle Farbgebung“, die für viele der lebendigsten Farben in der Natur verantwortlich ist: von den metallisch glänzenden Flügeln der Schmetterlinge und den strahlenden Federn der Vögel bis hin zur schillernden Epidermis von Pflanzen. Bei diesen natürlichen Vorbildern wird eine intensive Färbung durch präzise Architekturen diskreter biologischer Bausteine im Nanomaßstab erzeugt, typischerweise aus Biopolymeren (zum Beispiel Proteinen und Polysacchariden) oder nanoskalierten Mineralablagerungen. Beispielsweise werden in bestimmten Früchten und Blättern doppelbrechende Zellulosefasern zu einer periodischen helicoidalen Nanostruktur zusammengefügt, sodass

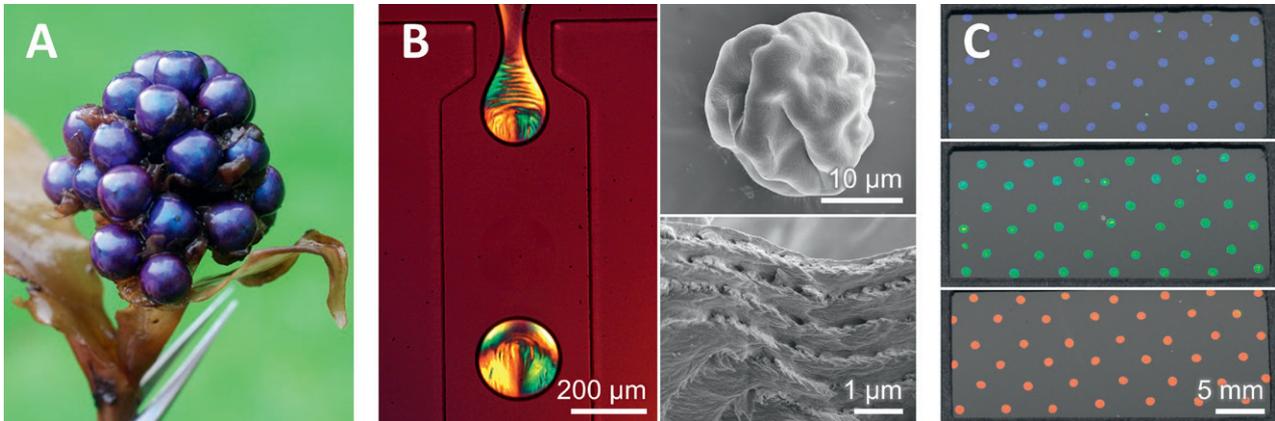


Abbildung 21: (A) Früchte der Marmorbeere wurden 1974 in Äthiopien gesammelt und in einem Fixiermittel auf Alkoholbasis konserviert. Das Exemplar wurde in der Herbarium-Sammlung der Royal Botanic Gardens, Kew, Großbritannien, aufbewahrt (Quelle: Paula Rudall, Royal Botanic Gardens, UK). (B) Photonische Mikropartikel aus Zellulose-Nanokristallen (Quelle: Parker et al. 2016, [CC BY 4.0]). (C) Rot, grün und blau bedruckte Zellulose-Nanokristall-Mikrofilme (Quelle: Zhao et al. 2019, [CC BY 4.0])

blaues Licht stark reflektiert wird.⁷⁷ Durch die Nutzung des weltweit am häufigsten vorkommenden Biopolymers Zellulose und das Nachbilden natürlicher Assemblierungsprozesse in der Pflanzenzelle entwickeln Forscherinnen und Forscher eine neue Generation nachhaltiger „photonischer“ Pigmente.

Zellulose-Nanokristalle (CNCs),⁷⁸ die industriell aus natürlich vorkommenden Zellulosefasern gewonnen werden, sind aufgrund ihrer inhärenten Biokompatibilität, biologischen Abbaubarkeit und skalierbaren Produktion ein vielversprechendes Material. Es konnte gezeigt werden, dass sich in Wasser dispergierte CNCs spontan im Nanomaßstab ansammeln, um die natürliche helicoidale Architektur nachzuahmen. Beim Trocknen bleibt diese Struktur erhalten und ermöglicht die intensive Reflexion von sichtbarem Licht. Mithilfe dieses Ansatzes können Farben aus dem gesamten sichtbaren Spektrum mit einem optischen Erscheinungsbild von matt bis glänzend oder metallisch erzeugt werden.⁷⁹ Die zentrale Herausforderung besteht nun darin, die Herstellung von photonischen Pigmenten auf Zellulosebasis in großem Maßstab zu entwickeln.

Um über die Produktion in kleinem Maßstab hinauszugehen, können verschiedene Strategien ins Auge gefasst werden. Wenngleich die kontinuierliche Folienherstellung (vergleiche synthetische Glitter) viele Vorteile bietet, hat sich eine Realisierung als schwierig erwiesen. Dies liegt in der Komplexität und den Zeitskalen

begründet, die für den Selbstassemblierungsprozess, der durch Verdampfung induziert wird, erforderlich sind. Eine disruptive Strategie besteht darin, CNC-Pigmente in diskreten Wassertröpfchen im Mikromaßstab direkt herzustellen, indem der Selbstorganisationsprozess räumlich eingeschränkt wird.⁸⁰ Nach dem Trocknen erzeugt jedes Tröpfchen ein diskretes, farbiges CNC-Mikropartikel, das als photonisches Pigment verwendet werden kann. Abhängig von der verwendeten räumlich einschränken- den Geometrie ist es durch dieses Verfahren möglich, eine Reihe von verschiedenen Mikropartikeln herzustellen: von irisierenden Glittern bis hin zu gleichmäßig gefärbten Pigmenten in einem einzigen Schritt. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass er leicht auf vorhandenen industriellen Emulsionstechnologien aufbauen kann, um ein Pulver herzustellen, das direkt in bestehende Formulierungen eingearbeitet werden kann.

Mit dem erfolgreichen Upscaling der Produktion von photonischen Pigmenten auf Zellulosebasis wird es möglich, wirklich nachhaltige, biokompatible und potenziell lebensmittelechte Produkte als Alternative zu herkömmlichen synthetischen Farbstoffen für massenmarktaugliche Anwendungen herzustellen. Pigmente auf Zellulosebasis eignen sich für die Verwendung in Druckfarben (Marktvolumen: 20,4 Milliarden US-Dollar bis 2022), für die Einfärbung von Lebensmitteln (3,75 Milliarden US-Dollar bis 2022), für Kosmetika (429,8 Milliarden US-Dollar bis 2022) und sogar für Sonnencremes (11,1 Milliarden US-Dollar bis 2020).

77 | Vgl. Vignolini et al. 2012.

78 | Vgl. Parker et al. 2018.

79 | Vgl. Zhao et al. 2019.

80 | Vgl. Parker et al. 2016.

6.5 Interview Stefan Buchholz, Firma Evonik Creavis GmbH

Prof. Stefan Buchholz ist Leiter der strategischen Innovationseinheit Creavis bei der Evonik Industries AG. Er ist von Haus aus Chemiker.

Prof. Buchholz, wie hoch schätzen Sie das Innovationspotenzial von aus der Natur abgeleitetem Wissen ein?

Ich schätze es grundsätzlich als hoch ein, möchte aber vor Idealismus warnen. Beispiele wie die Biotechnologie zeigen, dass nicht so viel passiert ist, wie Anfang des letzten Jahrzehnts gedacht. Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe und die Anwendung biotechnologischer Verfahren sind bei Weitem nicht so schnell vorangekommen wie damals erwartet. Diese Entwicklung ist nicht nur, aber doch maßgeblich bedingt durch den aus damaliger Sicht unerwartet niedrigen Ölpreis, den wir heute haben, und sie macht klar, welche Risiken Firmen eingehen, die sich frühzeitig für die Entwicklung neuer Technologien einsetzen.

Welche Rolle spielen Vorbilder aus der Natur für die Materialentwicklung in Ihrer Firma, das heißt Vorbilder für die Materialien selbst oder für den Herstellungsprozess?

Bei der Entwicklung neuer Werkstoffe wie auch bei der Entwicklung neuer Wirkstoffe spielt die Biotechnologie bei uns eine große Rolle. Lassen Sie mich drei Beispiele nennen: Vergangenes Jahr haben wir das Biotensid Rheance® One auf den Markt gebracht. Das Vorbild haben wir in der Natur gefunden. Den Produktionsstamm haben wir mit molekularbiologischen Methoden entwickelt. Wir produzieren das Tensid fermentativ. Es ist bioabbaubar und sehr bioverträglich sowie hautfreundlich. Wir widmen uns auch dem Thema Tissue Engineering: Aus menschlichen Zellen, geeigneten Nährmedien und Gerüstmaterialien können Sie zum Beispiel einen Knorpelersatz herstellen, das heißt ein humanidentisches Gewebe als Alternative zu einem

Implantat. Evonik konzentriert sich dabei auf die Herstellung der Gerüstmaterialien und der Nährmedien.

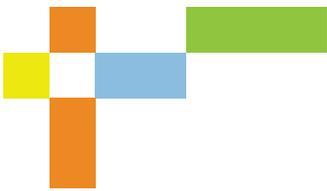
Im sogenannten Rheticus-Projekt, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, untersuchen wir zusammen mit Siemens in einer Versuchsanlage, wie man mittels Strom aus erneuerbaren Quellen und Bakterien Spezialchemikalien herstellen kann. Die Elektrolysetechnik kommt von Siemens. Dabei werden Kohlendioxid und Wasser in Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt. Bei der anschließenden Fermentation erzeugen wir bei uns am Standort in Marl dann mithilfe von Mikroorganismen die Chemikalien Butanol und Hexanol. Wenn Sie so wollen, ist dies eine Art hybride künstliche Photosynthese: eine Kopplung von biologischen mit nicht-biologischen Komponenten, wo im Fermentationsschritt aus den Rohstoffen Wasser und Kohlendioxid Wertstoffe synthetisiert werden.

Was sind aus Ihrer Sicht große Hürden für die Entwicklung und Umsetzung in diesem Bereich in der Zukunft, auch unabhängig von der Biologisierungfrage?

Die Kosten sind sicherlich einer der Haupthindernisfaktoren. Auch stellt sich die Frage: Wozu machen wir Biologisierung, beziehungsweise wozu können bioinspirierte Materialien, Produkte beitragen? Man sollte das nicht pauschal schönreden. Nicht jedes bioinspirierte Material ist zum Beispiel per se biologisch abbaubar oder nachhaltig. Für eine umfassendere Betrachtung bedarf es jeweils eines Life Cycle Assessment.

Wo liegen aus Ihrer Sicht die spezifischen Stärken und Schwächen in Deutschland in diesem Bereich?

Ich sehe Deutschland in diesem Bereich gut positioniert und führend in Europa. Im globalen Wettbewerb liegen sicher die USA vorne. Asien ist auf dem Gebiet stark im Kommen. Wir haben gerade ein Projekthaus für Tissue Engineering in Singapur aufgebaut. Hier finden wir hervorragende Kooperationspartner auf engstem Raum, wie man sie sonst in diesem Bereich und in der Dichte nur in der Boston Area findet. Dies trägt zur Internationalisierung der FuE-Aktivitäten von Evonik bei.



7 Haften und Kleben

Prof. Dr. Karin Jacobs

Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Die Natur bietet unzählige Wege, zwei Objekte miteinander zu verbinden, zum Beispiel verhaken sich Kletten im Fell von Tieren, wodurch die Samen räumlich weit verbreitet werden und somit der Fortbestand der Pflanzenart begünstigt wird. Auf diesem mechanischen Prinzip einer verstärkten Reibung durch Verhakung basiert der Klettverschluss. Viele solcher und ähnlicher Haftphänomene haben schon kurz nach ihrer Entdeckung und Beschreibung Einzug in unseren Alltag gehalten. Deshalb ist es ein lohnenswertes Unterfangen, in der Natur weiterhin nach Vorbildern für technische Anwendungen zu suchen. Interessant ist es auch, die „Antihaftung“ zu betrachten, also solche Fälle, in denen ein Anhaften in der Natur verhindert wird; Anwendungen im Hinblick auf Antifouling, antibakterielle Oberflächen, Nichtbenetzung etc. könnten darauf abzielen. Besonders spannend sind Systeme, die ein kontrolliertes Haften und Lösen möglich machen, beispielsweise bei den Motorproteinen (verantwortlich zum Beispiel für Muskelkontraktionen) oder – auf eher makroskopischer Ebene – bei der Bewegung von Geckos an senkrechten oder gar überhängenden Flächen.

Haften und Kleben sind zwei Begriffe, die beschreiben, dass eine Kraft zwei Dinge zusammenhält, ohne diese Kraft jedoch näher zu charakterisieren. Von Kleben statt von Haften spricht man im Allgemeinen dann, wenn ein fluider Haftvermittler verwendet wird; der Klebstoff haftet dann jeweils an den zu verbindenden Objekten, wie beispielsweise Pollenkitt, der Pollen an Bienenbeinen haften lässt.⁸¹ Manche Haftvermittler initiieren sogar chemische Bindungen, was die Verbindung dann besonders stark macht. Selten ist für die Haftung von Objekten nur ein einzelnes Phänomen verantwortlich, wie zum Beispiel bei den oben erwähnten Kletten oder bei den Saugnäpfen von Tintenfischen, die eine Beute festhalten können. Bei Letzteren ist es nur der Druckunterschied zwischen dem an der Beute anhaftenden Saugnapf und dem – in diesem Fall – hydrostatischen Druck des umgebenden Wassers.

Der Ursprung der Kraft ist hier also die Gravitation. Meistens ist die Ursache der Haftung ein Zusammenspiel vieler Kräfte, die meist elektrostatischen oder elektrodynamischen Ursprungs⁸² sind, beispielsweise ionische Wechselwirkungen aufgrund statischer Ladungen oder Van-der-Waals-Wechselwirkungen aufgrund interagierender (permanenter oder induzierter) Dipole.⁸³ Deshalb ist es oft notwendig, die Polarisierungseigenschaften der beteiligten Materialien in der Natur zu kennen, um diese dann in der entsprechenden technischen Anwendung zu optimieren.⁸⁴ Eine weitere wichtige Rolle spielen quantenmechanische Kräfte (zum Beispiel die Born-Abstoßung), die nur innerhalb sehr kurzer Reichweiten relevant sind, die aber dafür sorgen, dass sich beispielsweise zwei Proteinketten nicht durchdringen können. Das Zusammenspiel elektrodynamischer und quantenmechanischer Kräfte bestimmt dann etwa den Kontaktwinkel einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche, sei sie strukturiert oder unstrukturiert, die Adsorption von Molekülen oder die Haftkraft von Fliegen, Geckos oder Bakterien auf Oberflächen (siehe Kapitel 7.1 und 7.2).^{85, 86} Somit ist auch die Haftung aufgrund von Kapillarkräften, sterischen oder hydrophoben Wechselwirkungen auf dieses Zusammenspiel zurückzuführen. Zudem sorgen Wasserstoff- und Schwefelbrücken für Haftung; zum Beispiel stabilisieren Wasserstoffbrücken größtenteils den Zusammenhalt der beiden Stränge der DNS, unterstützt von elektrodynamischen Kräften. Haftung und Lösen der Haftung tritt auch bei Motorproteinen auf, wo das gezielte Herbeiführen oder Lösen von chemischen Bindungen evolutionär optimiert wurde und so eine Muskelkontraktion erlaubt. In diesem Zusammenhang kann auch Licht genutzt werden, indem es gezielt eine chemische Bindung in einem Molekül auslöst, beispielsweise bei UV-härtendem Klebstoff, der mittlerweile ein breites Anwendungspotenzial bewiesen hat – von der Automobilindustrie bis zur Zahnmedizin.

In der Natur ist dieses Zusammenspiel der Kräfte durch die Evolution für die jeweilige Situation optimiert: Ein Beispiel dafür ist der Klebstoff, der Muscheln im salzigen Meerwasser an Felsen festhält, ein zweites sind die Füße des Geckos, mit denen er über Überhänge flitzen kann, weil sie über Billionen kleinster Haftpads eine Optimierung der Kontaktfläche erzielen und auf diese Weise starke, reversible Haftung garantieren. Ersteres dient etwa als Vorbild für neuartige Klebstoffe (siehe Kapitel 7.3), Letzteres für neuartige Greifsysteme bei Robotern (siehe Kapitel 7.2).

81 | Vgl. Lin et al. 2013.

82 | Im Folgenden sind elektrostatische Wechselwirkungen im Begriff der elektrodynamischen Wechselwirkungen inkludiert.

83 | Vgl. Israelachvili 2011.

84 | Zum Beispiel führte die Aufklärung der Gecko-Adhäsion in der Anwendung zu einem wiederverwendbaren Klebeband („Gecko-Tape“), die Beschreibung des Lotus-Effekts ermöglichte die Entwicklung von Wandfarben, Dachziegeln, Sanitärkeramik etc., die sich den selbstreinigenden Effekt hydrophober, rauer Oberflächen zunutze machen.

85 | Vgl. Huber et al. 2005.

86 | Vgl. Bäumchen et al. 2015.

Somit sucht man für eine technische Anwendung entweder nach einem System in der Natur, das eine sehr ähnliche Situation löst, oder man überträgt ein in der Natur entdecktes Prinzip auf eine gänzlich anders geartete Situation und passt dieses entsprechend an. Weitere von der Natur inspirierte Beispiele werden im Folgenden noch ausführlicher beschrieben: Die Hydrophobizität des Wasserfarns inspiriert eine Antifouling-Beschichtung für Schiffe (siehe Kapitel 7.4), und der Kartoffelkäfer gibt den Hinweis auf optimierte kleine Haftpads (siehe Kapitel 7.1).

Besondere Aufmerksamkeit wird derzeit Biomakromolekülen (Proteinen, Peptiden etc.) zuteil, die im Zusammenhang mit speziellen Situationen gefunden wurden – beispielsweise bei der schon erwähnten dauerhaften und starken Anhaftung von Muscheln, bei der Zell-Zell- (zum Beispiel Wundheilung) oder der Zell-Oberflächenadhäsion (zum Beispiel Bakterienadhäsion beziehungsweise deren Prävention oder die Anhaftung von Knochenzellen an Implantaten). Eine spezielle Klasse von kleinen, globulären Proteinen, sogenannte Hydrophobine, sorgt derzeit für Furore, zum Beispiel in der Nahrungsmittelindustrie. Hydrophobine können aufgrund ihrer stark grenzflächenaktiven Eigenschaften Emulsionen besonders gut stabilisieren. Sie bilden – je nach Bestandteilen der Emulsion und der Art der Präparation – eine Einzel- oder eine Doppellage zwischen den Tröpfchen und verhindern deren Koaleszieren. Weitere Eigenschaften dieser Proteine beschreibt Markus Linder (siehe Kapitel 7.5). Auch Seidenproteine sind materialwissenschaftlich hochinteressant, insbesondere aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften und ihrer Biokompatibilität. In der Industrie erfahren derzeit Biomakromoleküle als Rohstoffe besondere Aufmerksamkeit: Diese Makromoleküle, die durch Fermentation aus Naturstoffen erzeugt werden können und so die Nutzung von Erdölderivaten überflüssig machen, finden beispielsweise als nachwachsendes Ausgangsmaterial zur Synthese eines Klebstoffs Verwendung.

Wie aus diesen Beispielen hervorgeht, sind neue Erkenntnisse im Bereich des biologisch inspirierten Haftens für technische oder medizinische Anwendungen oft direkt nutzbar. Aus diesem Grund ist vor der Veröffentlichung der grundlegenden Prinzipien die Einreichung entsprechender Patente verbreitet.

Dieses Gebiet der Bioadhäsion wird von vielen Gruppen unterschiedlicher Disziplinen erforscht, weshalb die Resultate auch in unterschiedlichen Fachjournals publiziert werden. Fortschritte, die eine Disziplin hervorbringt (beispielsweise in den physikalischen Wissenschaften die Erkenntnisse zur Rolle des Kontaktwinkels bei der Adhäsion), finden teilweise nur sehr

langsam Eingang in die Nachbardisziplinen. Es gibt deshalb zahlreiche Publikationen, die zwar gute fachspezifische Ergebnisse aufzeigen, jedoch bei der Interpretation teilweise fehlerhaft sind, da ihnen Erkenntnisse anderer Disziplinen fehlen. Forschungsgruppen und Konsortien, die an einem System disziplinübergreifend arbeiten, sind hier weitaus erfolgreicher. Besonders vorteilhaft ist es, wenn Bachelor- und Masterstudierende, Doktorandinnen und Doktoranden sowie Postdoktorandinnen und Postdoktoranden selbst eine interdisziplinäre Ausbildung genossen haben, beispielsweise in Biophysik, Bionik oder Biophysical Engineering. Interdisziplinäre Forschungsergebnisse sind im Gegenzug häufig schwieriger zu publizieren, da den Gutachtenden selbst oft der interdisziplinäre Zugang fehlt. Neu gewonnene Erkenntnisse aus einer anderen Fachdisziplin als der der Gutachterin beziehungsweise des Gutachters können deshalb unter- oder überschätzt werden. Typische Reibungspunkte zwischen Gutachtenden und Autorinnen und Autoren oder zwischen Vortragenden und Fragestellenden sind beispielsweise Experimente, die *in vitro* oder *in silico* durchgeführt werden, da sie eine bessere Kontrolle der Systemparameter, aber dennoch auch Rückschlüsse auf die *In-vivo*-Situation erlauben sollen. Auch wird die Rolle von Simulationen in diesem Gebiet immer wieder unterschiedlich gesehen: Einerseits gibt es „Communities“, für die eine Simulation schon den Stellenwert eines Experiments erreicht und die Limitierungen oder Artefakte einer Simulation nicht erkennen, andererseits stellen die Gruppen, die die Simulationen publizieren, deren mögliche Limitierungen auch nicht immer klar dar. Zudem führen neue, stark verbesserte und nutzerfreundliche Softwarepakete dazu, dass immer mehr Forschende diese einsetzen, aber die Details der Simulation nicht (mehr) kennen: Zum Beispiel kann eine Simulationssoftware, die keine thermischen Fluktuationen berücksichtigt, einige Situationen dennoch gut beschreiben, einige aber auch nicht – zum Beispiel die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls einer Vesikelmembran.⁸⁷

Um auch in Zukunft große Fortschritte auf diesem Gebiet zu erzielen, das sich dynamisch entwickelt und großes Anwendungspotenzial besitzt, sollten interdisziplinär aufgestellte und ausgebildete kleinere und größere Forschungskonsortien gefördert werden, in denen neben der Forschung auch ein gegenseitiges Voneinander-Lernen im Vordergrund steht. Zudem wäre es wünschenswert, in solchen Konsortien arbeitende Promovierende in einem Gebiet fortzubilden, das nicht in ihrem eigenen Fachbereich gelehrt wird. Fachbereiche sollten beispielsweise moderne Forschungsthemen in Wahlpflichtvorlesungen so vorbereiten, dass sie von Studierenden anderer Fachbereiche



gehört werden können. Um diesen Gedanken der internationalen Forschungsgemeinschaft näherzubringen, wäre es sinnvoll, ein neues Peer-reviewed-Journal zu gründen; dieses sollte sich auf hochrangige Forschungsergebnisse konzentrieren, die nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit erzielt werden könnten. Daran angepasst wäre es sinnvoll, in den Zusatzinformationen zu einer Publikation (dem „Supplementary Material“) spezielles Fachwissen einer Disziplin, das anderen Disziplinen zum Verständnis des Artikels fehlt, bereitzustellen.

7.1 Haare mit unbeschränkter Haftung⁸⁸

Prof. Dr. Stanislav Gorb
Zoologisches Institut, Universität Kiel

Insekten verlassen sich bei der Fortbewegung an den glatten, vertikalen Wänden und an der Decke nach bisherigen Erkenntnissen allein auf ihre Mikrohärchen und haben deren Form für unterschiedliche Untergründe optimiert.⁸⁹ Besonders stark haften Haare, deren Enden sich spatel- oder pilzförmig verbreitern⁹⁰ (siehe Abbildung 22). Doch während das Klebe- und das Häkchenprinzip im Tesafilm und beim Klettverschluss schon lange technisch umgesetzt werden, tauchen zum Beispiel Folien mit Mikrohärchen in unserem Alltag noch nicht auf.

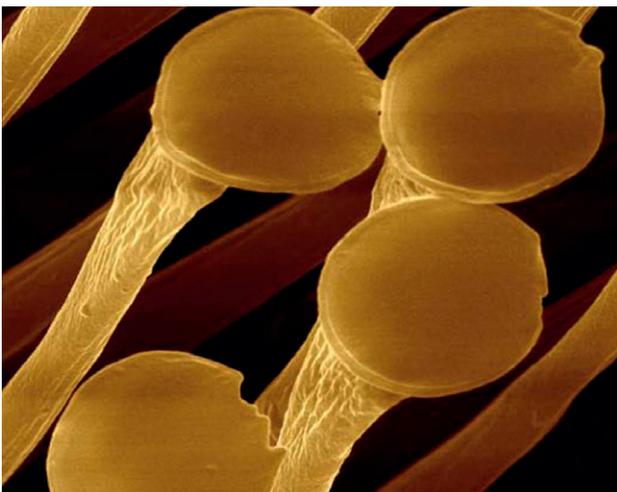


Abbildung 22: Hafthaare des männlichen Kartoffelkäfers *Leptinotarsa decemlineata* (Quelle: Stanislav Gorb, Universität Kiel)

Interessanterweise gibt es keine einfache Erklärung für diesen Mechanismus. Es handelt sich vielmehr um eine Kombination aus mikro- und nanostrukturierten Oberflächen, viskoelastischen Materialien, biphasischen Flüssigkeiten und deren Transportsystemen sowie der Art der Bewegung selbst. Einige dieser Eigenschaften sind, vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet, trivial, andere dagegen sind hochkomplex und erfordern weitere experimentelle Untersuchungen und theoretische Überlegungen. Neben Haftsystemen, die der Fortbewegung dienen, gibt es eine enorme Vielfalt an Haftsystemen, die andere Funktionen erfüllen.

Ermöglicht durch den Einsatz neuester experimenteller Techniken, Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen, Kraftmessungen und aufwendiger Mikroskopieverfahren kam in den vergangenen zehn Jahren starkes Interesse an biologischen Haftsystemen auf. Es stellte sich heraus, dass biologische Haftstrukturen wichtige Eigenschaften im Hinblick auf Evolutions- und ökologische Untersuchungen besitzen. Zudem bergen detaillierte Informationen über Haftstrukturen und -mechanismen ein großes Potenzial für biomimetische Anwendungen.

Unsere Forschungsgruppe hat in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern mehrere funktionelle Prinzipien der Mikrohärchen

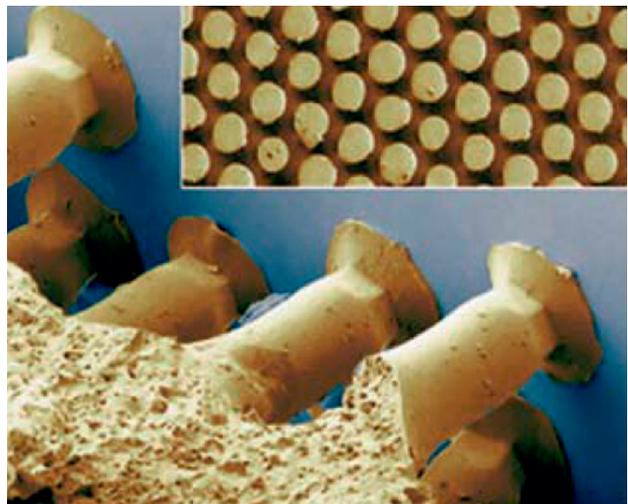


Abbildung 23: Mikroskopische Aufnahme der biomimetischen Oberflächenstruktur des synthetischen Haftmaterials (Spitzen der Haftscheibchen 30 µm im Durchmesser). Das von Insektenfüßsohlen inspirierte Material (ockerfarben) haftet an Glas (blau) (Quelle: Stanislav Gorb, Universität Kiel).

88 | Dieser Beitrag ist ein Auszug aus einem Artikel (vgl. Gorb 2009), der ursprünglich in der Zeitschrift „Lab & More“ in der Ausgabe 1/2009 veröffentlicht wurde.

89 | Vgl. Gorb 2006.

90 | Vgl. Gorb et al. 2006.

erstmals erfolgreich in einem künstlichen Haftmaterial nachgeahmt, das durch ein Mikrospritzgießverfahren (Micro Moulding) hergestellt wurde. Die Haftkraft der biomimetischen Struktur beruht auf Mikrostrukturen, die wie winzige Pilze geformt sind^{91, 92} (siehe Abbildung 23). Nach Untersuchung von mehr als 300 verschiedenen Haftsystemen haben wir uns für das Design einer Mikrostruktur entschieden, die oft bei Fußsohlen der Männchen verschiedener Käferarten vorkommt. Wenige Quadratzentimeter des mikrostrukturierten Materials halten an Glaswänden mit glatten Oberflächen einige Kilogramm schwere Gegenstände, an der Decke allerdings nur bis zu zehnmal weniger Gewicht. Glatte Strukturen, also etwa Glas oder poliertes Holz, eignen sich gut als Untergrund für solche Haftstreifen – Raufasertapete dagegen kaum. Auch Insekten haben Schwierigkeiten, auf Oberflächen mit

feiner Rauigkeit zu laufen. Dies ist ein grundsätzliches Problem des Haftmechanismus. Aber: Nach dem Ablösen hinterlässt das Material auf der Oberfläche keine sichtbaren Spuren und haftet auch noch, nachdem es hunderte Male angebracht und wieder abgerissen wurde. Wenn es verschmutzt ist, lässt es sich im Gegensatz zu Klebestreifen sogar waschen, ohne seine Haftkraft einzubüßen. Verwenden lässt sich das haarige Haftmaterial unter anderem als Schutzfolie für empfindliche Gläser oder einfach als wiederverwendbarer Klebestreifen – Kühlschrankmagnete ade, jetzt kommen die Mikrohärchen, die zudem an Spiegel, Schrank und Scheibe halten. Auch bei dynamischen Vorgängen bewies das Material schon seine Leistungsfähigkeit: Ein 120 Gramm schwerer Roboter konnte mit den künstlichen Haftfasern an der Fußsohle eine senkrechte Glaswand erklimmen.⁹³

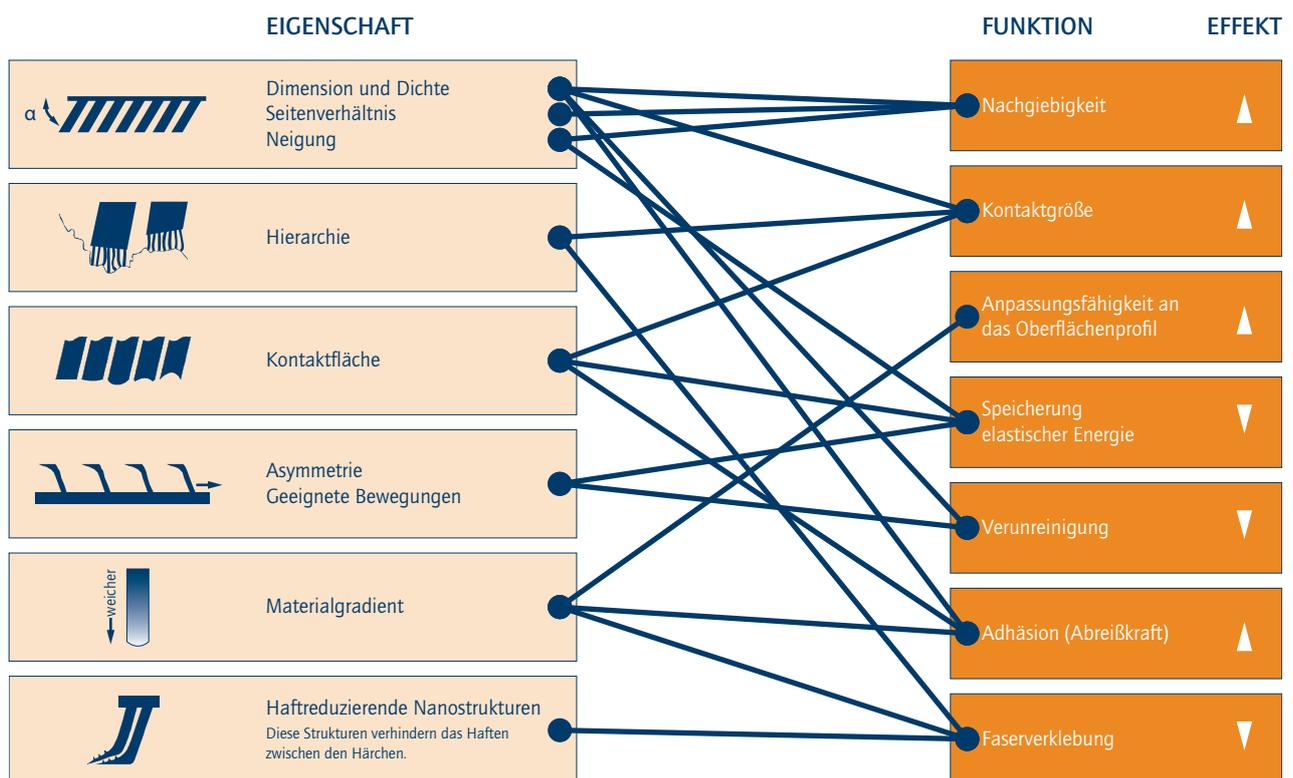
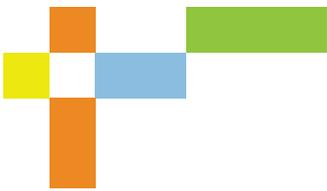


Abbildung 24: Einige Prinzipien (Eigenschaften), nach denen biologische reversible Haftsysteme arbeiten, und ihre Beziehung zu spezifischen Funktionen. Die resultierende Wirkung, die zur Erzeugung starker Haftung erforderlich ist, ist auf der rechten Seite dargestellt. Die Pfeile geben an, ob die Funktion durch ein bestimmtes Konstruktionsmerkmal verbessert oder verschlechtert wird. Die gleichzeitige Umsetzung all dieser Merkmale in einem einzigen künstlichen System ist erstrebenswert, aber nahezu unmöglich. Je nach Anforderungen an ein bestimmtes biologisch inspiriertes Material oder System kann jedoch ein Prinzip oder eine Kombination aus einigen dieser biologischen Erkenntnisse umgesetzt werden (Quelle: Stanislav Gorb, Universität Kiel).

91 | Vgl. Gorb/Varenberg 2007.

92 | Vgl. Varenberg/Gorb 2007.

93 | Vgl. Gorb et al. 2007.



Mit den pilzköpfigen Haftärchen ist bislang nur ein Mechanismus, der Insekten Halt gibt, technisch umgesetzt. Und die Hafttechnik der Insekten ist der künstlichen immer noch klar überlegen: Insekten, Spinnen und Geckos können nach Belieben zwischen den Haft- und Verklammerungsmethoden wechseln, je nachdem, über welchen Untergrund sie gerade laufen.

Diese Ergebnisse, die in Untersuchungen an biologischen Objekten gewonnen wurden, verdeutlichen für die Materialwissenschaft die Notwendigkeit, die inhärenten Materialeigenschaften mit der Geometrie des Kontakts zu verknüpfen. Die Effizienz der natürlichen Systeme kann nicht eins zu eins umgesetzt werden. Aber einige der Konzepte lassen sich in die Welt der Materialien übertragen, um Oberflächen mit bestimmten Eigenschaften und Funktionen zu konstruieren, die man in biologischen Systemen beobachtet hat (siehe Abbildung 24). So wird die immense Vielfalt biologischer Haftmechanismen Materialwissenschaftler und Ingenieurinnen beständig zur Entwicklung neuer Materialien und Systeme anregen. Daher sollten breit angelegte vergleichende funktionelle Untersuchungen an biologischen Oberflächen intensiviert werden, um daraus die wesentlichen strukturellen, chemischen und mechanischen Prinzipien ableiten zu können, die sich hinter den Funktionen verbergen. Die Nutzung der lebenden Natur als endlose Quelle der Inspiration kann zudem als ein weiterer Grund angesehen werden, die biologische Vielfalt zu erhalten.

7.2 Bioinspirierte Haftstrukturen für Robotik und Industrie 4.0

Dr. Karsten Moh, Dr. René Hensel, Prof. Dr. Eduard Arzt
INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien GmbH,
Saarbrücken

Neue robotische Systeme benötigen für die voranschreitende Digitalisierung in der industriellen Produktion neue Materialien für das sichere Greifen von Bauteilen und Objekten. Die hier vorgestellte Gecomer®-Technologie beruht auf dem sogenannten Gecko-Effekt: Inspiriert von den feinstrukturierten, haarigen Haftoberflächen des Geckofußes werden synthetische Haftsysteme entwickelt. Diese können, wie der Geckofuß selbst, temporär und reversibel auf verschiedensten Oberflächen

haften. Die adhäsive und somit „klebende“ Wechselwirkung basiert auf rein physikalisch wirkenden Van-der-Waals-Kräften.⁹⁴ Diese rückstandsfreie Haftung ohne Klebstoff ist somit für zahlreiche Anwendungen interessant. Heute sind 80 bis 90 Prozent der Greifsysteme mechanische oder Vakuumsysteme. Unsere Marktstudien belegen, dass diese etablierten Greifsysteme in absehbarer Zeit an technologisch unüberbrückbare Grenzen stoßen werden: Das Handling von Mikrosystembauteilen bei präziser Positionierung sowie die Handhabung im Vakuum funktionieren mit den herkömmlichen Technologien nicht mehr. Diese Grenzen werden mit der Gecomer®-Technologie überwunden und bieten Alleinstellungsmerkmale, die für die neue Technologie als „Enabling Technology“ ein großes Geschäftspotenzial eröffnen. Neben der Miniaturisierbarkeit und der Vakuumtauglichkeit ermöglichen es Gecomer®-Systeme zusätzlich, auch höchst empfindliche Objekte wie Folien sanft und rückstandsfrei bewegen zu können. Der Ablösevorgang, der derzeit vielen Anwenderinnen und Anwendern Schwierigkeiten bereitet, kann zuverlässig implementiert werden. Energie- und Ressourceneffizienz sowie Lärmemission sind gegenüber herkömmlichen Systemen drastisch verbessert, da aufwendige Zusatzapparaturen (zum Beispiel Magnet- und Saugsysteme) gänzlich wegfallen.

Der wissenschaftliche und der zu erwartende kommerzielle Erfolg der patentierten Gecomer®-Technologie veranschaulicht, wie ein über Jahrtausende evolutionär entwickeltes Konzept als Lösung für neuartige technologische Anforderungen dienen kann und damit den Grundstein für neue Anwendungen und Produkte legt.

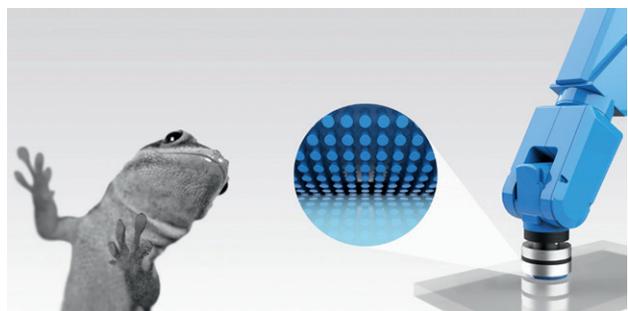


Abbildung 25: Von der Natur zur Technologie – bioinspirierte Haftstrukturen für automatisierte Handhabungsaufgaben (Quelle: INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien GmbH)

94 | Vgl. Huber et al. 2005.

7.3 Muschelinspirierte Adhäsion⁹⁵

Prof. Dr. Matthew Harrington
McGill University, Montreal, Kanada

Klebstoffe spielen eine immens wichtige Rolle bei vielen technischen und auch biomedizinischen Anwendungen; doch in wasserhaltigen und feuchten Umgebungen haben moderne synthetische Klebstoffe oft Schwierigkeiten, Oberflächen zusammenzuhalten – denn Wasser, Ionen und Biofilme konkurrieren auf den meisten Oberflächen um den Platz. Ein effektiver Unterwasserklebstoff muss also diese anderen Moleküle übertreffen, um eine starke physikalische oder chemische Wechselwirkung zwischen den Oberflächen zu erzeugen. Besonders herausfordernd und relevant ist das für chirurgische und dentale Klebstoffe. Um die Chemie der Nasshaftung zu verstehen, haben sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler den Meeren zugewandt und gefragt, wie Organismen an nassen Oberflächen in der felsigen Küste haften können, wo der hohe Salzgehalt und der pH-Wert denen von Körperflüssigkeiten ähneln.

Insbesondere Muscheln sind in der Lage, trotz des überaus hohen Salzgehalts und des starken Algenbewuchses auf fast jeder Oberfläche (Gestein, Holz, Teflon) unter Meerwasserbedingungen zu haften. Die Forschenden haben über vierzig Jahre damit verbracht, die Chemie, die dieser Fähigkeit zugrunde liegt, aufzuklären und eine Handvoll Proteine zu identifizieren, die für die Haftung verantwortlich sind. Diese Muschelklebeproteine (Mussel Adhesive Proteins, MAPs) sind mit einer posttranslationalen Modifikation der Aminosäure Tyrosin angereichert, bekannt als 3,4-Dihydroxyphenylalanin oder DOPA.⁹⁶ Aufgrund seiner chemischen Struktur ist DOPA in der Lage, sich an zahlreichen Wechselwirkungen mit verschiedenen Oberflächen zu beteiligen, zum Beispiel über Metallkoordination, Wasserstoffbrückenbindung, Pi-Kation⁹⁷ und hydrophobe Wechselwirkungen. Darüber hinaus kann DOPA unter Meerwasserbedingungen oxidiert werden, sodass es mit Biofilmen kovalente Bindungen eingehen kann.

Polymerchemikerinnen und -chemiker haben sich diese Chemie zunutze gemacht und eine Reihe mit DOPA angereicherter, muschelinspirierter Materialien und Klebstoffe entwickelt. In der

Tat wurden in den letzten zehn Jahren zunehmend neue Materialien auf DOPA-Basis vorgestellt, darunter selbstheilende und sogar synthetische Klebstoffe: Diese werden für die pränatale Chirurgie verwendet, wo chirurgische Nähte nicht möglich sind und eine Ruptur zu einer vorzeitigen Geburt führen kann. Muschelinspirierte Klebstoffe auf Basis der Katecholchemie haben sich zwar als vielversprechend erwiesen, bergen aber auch einige Nachteile, vor allem die Tendenz von DOPA zur Oxidation. So konzentrierten sich neuere biologische Untersuchungen darauf, zu verstehen, wie Muscheln den Klebstoff weiterverarbeiten. Dabei zeigte sich eine komplexe pH- und Redoxkontrolle der Mikroumgebung.

Tatsächlich werden MAPs als Flüssig-Flüssig-Phasenseparation (Liquid-Liquid Phase Separation, LLPS) gelagert. Dabei handelt es sich um eine dichte Flüssigphase mit geringer Oberflächenspannung, die das Auftragen der Klebstoffmoleküle auf die Oberfläche in feuchter Umgebung erleichtert.⁹⁸ Darüber hinaus spielen positiv geladene, große Aminosäuren (wie Lysin und Arginin, die in MAP-Sequenzen immer in der Nähe von DOPA vorkommen) eine Rolle bei der Verdrängung positiv geladener Gegenionen auf negativ geladenen Oberflächen und verbessern die Unterwasserhaftung.⁹⁹ Die Forschung integriert bereits die neu entdeckten Konstruktionsprinzipien in die nächste, leistungsfähigere Generation von muschelinspirierten Klebstoffen und Hydrogelen. Bis jedoch die faszinierende Chemie dieser muschelinspirierten Klebstoffe wirklich verstanden ist, müssen wohl noch einige weitere Tricks der Natur erforscht werden.



Abbildung 26: Muscheln haften an harten Oberflächen felsiger Küsten unter Verwendung der Klebebeläge ihres Byssus.¹⁰⁰ Die Adhäsion und die mechanischen Eigenschaften von Byssalfäden werden durch die verschiedenen Wechselwirkungen von Dihydroxyphenylalanin (DOPA) in den Byssus-Proteinen vermittelt (Quelle: Matthew Harrington, McGill University).

95 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

96 | Vgl. Waite 2017.

97 | Unter Pi-Kation-Wechselwirkung versteht man eine nicht-kovalente molekulare Bindung.

98 | Vgl. Waite 2017.

99 | Vgl. ebd.

100 | Als Byssus wird das Sekret aus den Fußdrüsen verschiedener Muschelarten bezeichnet.



7.4 Reibungsreduktion und Antifouling mit bionischer Beschichtung

Prof. Dr. Thomas Schimmel

Institut für Angewandte Physik und Institut für Nanotechnologie sowie Materialwissenschaftliches Zentrum für Energiesysteme (MZE), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Rund neunzig Prozent des internationalen Handels wird über die Schifffahrt abgewickelt. Schiffe verursachen jedoch schwere Umweltschäden: Schätzungen zufolge erzeugen die 15 weltweit größten Schiffe vergleichbar viel Schwefeldioxid (SO_2) wie alle Autos der Welt zusammen. Darüber hinaus setzen Schiffe große Mengen hochgiftiger Substanzen (Biozide) frei, die gegen das Biofouling an Schiffsoberflächen aufgebracht werden; denn Algenbewuchs erhöht die Reibung des Schiffsrumpfs im Wasser, wodurch hohe Energieverluste entstehen.

Drei der wesentlichen schiffsspezifischen Probleme resultieren aus dem Kontakt des Schiffsrumpfs mit dem Wasser:

- Reibung: Ein Großteil des Treibstoffverbrauchs ergibt sich aus der Reibung des Schiffsrumpfs mit dem umgebenden Wasser.
- Korrosion: Das Phänomen wird ebenfalls weitgehend durch den direkten Kontakt des Schiffs mit dem umgebenden stark salzhaltigen Meerwasser verursacht.
- Fouling: Meeresorganismen würden nicht wachsen, wäre das Schiff von Luft und nicht von Wasser umgeben.

Unser Ansatz,¹⁰¹ inspiriert von Schwimmfarnen (*Salvinia molesta*, siehe Abbildung 27), ist es, „Schiffe in einer Hülle aus Luft gleiten zu lassen“. Damit gehen wir einen vielversprechenden Weg zur Lösung der genannten Probleme: Eine Luftschicht weist eine wesentlich geringere Viskosität als Wasser auf und dient dem Schiff als „Gleitschicht“. Ferner verhindert das Umhüllen des Schiffsrumpfs mit einer dauerhaften Luftschicht unter Wasser den direkten Kontakt des Schiffs mit dem Wasser und beugt damit Korrosion und Fouling vor.

Die Prototypen unserer künstlichen Oberflächen am KIT (siehe Abbildung 28) sind inzwischen in der Lage, Luftschichten unter Wasser auch über mehrere Jahre hinweg zu halten. Oberflächen, die unter Wasser trocken bleiben, eröffnen enorme Perspektiven für die Anwendung, zum Beispiel für Schiffe, Ölplattformen und Wasserleitungen sowie Wasserbehälter ohne Fouling.



Abbildung 27: Natürliche Oberfläche des Schwimmfarns *Salvinia molesta* mit einem Wassertropfen, der auf den Spitzen von speziellen Härchen steht und die Blattoberfläche nicht berührt. Deutlich im rechten Bild erkennbar ist die Schneebesen-Form der Härchen (Quelle: Arbeitsgruppe Thomas Schimmel, Karlsruher Institut für Technologie KIT).

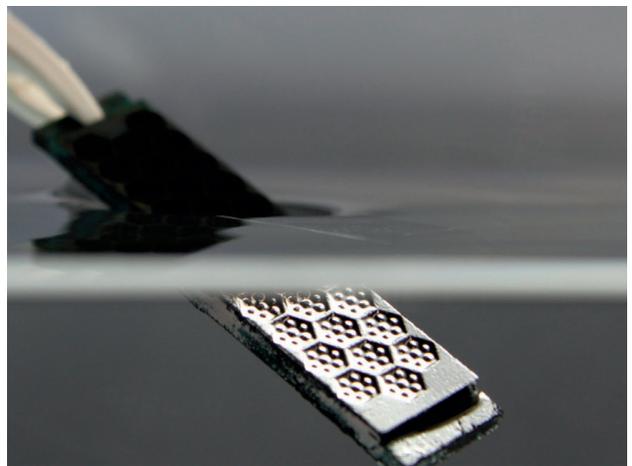


Abbildung 28: Künstlich hergestellte Polymerprobe mit strukturierter, unter Wasser lufthaltender Oberfläche. Die Reflexion des Lichts an der Luftschicht lässt die schwarze Polymeroberfläche unter Wasser silbern erscheinen (Quelle: Arbeitsgruppe Thomas Schimmel, Karlsruher Institut für Technologie KIT).

101 | Der Ansatz wurde als Kooperationsprojekt zwischen den Universitäten Karlsruhe (KIT), Bonn und Rostock im Rahmen des BMBF-Projekts ARES validiert und wird nun im EU-Projekt AIRCOAT im Rahmen des Horizon-2020-Programms umgesetzt. Das Projekt ARES (Air Retaining Surfaces) wurde durch das BMBF VIP+ Programm gefördert. Ein weiteres Projekt fördert die Baden-Württemberg Stiftung.

7.5 Bioinspirierte Grenzflächenmoleküle¹⁰²

Prof. Dr. Markus Linder
 Department of Bioproducts and Biosystems,
 Aalto University, Finland

Grenzflächen spielen eine wesentliche Rolle in vielen Aspekten der Werkstofftechnik, angefangen von Klebstoffen und Beschichtungen über Kosmetika bis hin zu Lebensmitteln und vielem mehr. Ebenso müssen lebende Organismen Grenzflächen kontrollieren und sie zeigen eine breite Palette an Lösungen dafür auf. Ein System von besonderem Interesse wurde bei Fadenpilzen gefunden – das sind Pilze, die lange Mycelien und häufig auch Fruchtkörper wie die üblichen Speisepilze bilden. Die Besonderheit ist nun, dass diese Pilze Varianten eines Proteintyps namens Hydrophobin entwickeln, um die Grenzflächen zu kontrollieren, mit denen sie in Berührung kommen. Dabei haben die verschiedenen Varianten der Hydrophobine unterschiedliche Aufgaben: Einige steuern beispielsweise das Haftvermögen an Oberflächen, die Benetzungseigenschaften von Sporen oder das oberirdische Wachstum der Pilze.

Diese Hydrophobine sind in mehrfacher Hinsicht als Biomaterialien interessant. Ein praktischer Aspekt ist, dass sie als reine Proteine fungieren, die in die Umgebung ausgeschieden werden. Wir können sie daher genauso verwenden, wie jeder chemische Inhaltsstoff verwendet würde. Die Forschung hat mittlerweile ein gutes Verständnis dafür, wie und warum Hydrophobine an Grenzflächen wirksam sind. Einige Hydrophobine bilden an Grenzflächen ein stark miteinander verbundenes 2D-Netzwerk (siehe Abbildung 29).

Die Rasterkraftmikroskopie (AFM) zeigt, wie sich Hydrophobin-Moleküle zu flächigen, miteinander verbundenen Strukturen selbstassemblieren. Die detaillierte Analyse verschiedener Strukturdatensätze ermöglicht es uns, genau zu modellieren, wie sich Hydrophobin-Moleküle zusammenlagern: Sie sind amphiphil, das heißt, eine Seite des Proteins wendet sich von Wasser ab, die

andere Seite wendet sich Wasser zu. Da sich alle Moleküle auf die gleiche Weise drehen, ist die gesamte flächige Struktur miteinander verbundener Moleküle amphiphil. Deren kollektive Eigenschaften führen zu molekularen Oberflächenschichten, die ausgesprochen elastisch sind – in der Tat sind sie elastischer als jedes andere bekannte System – und eine Art molekularen „Haftfilm“ bilden. Dies ermöglicht Anwendungen wie sehr starke und stabile Schäume sowie effiziente Dispersionen unlöslicher Verbindungen und selbstassemblierender Grenzflächen in Biosensoren. Die Hydrophobin-Proteine können für die genannten Anwendungen genutzt und in großen Mengen in Bioreaktoren hergestellt werden. Da Hydrophobine aus essbaren Pilzen verwendet werden können, kann der Mensch ihnen ohne Risiko ausgesetzt werden. Die Gentechnik macht es möglich, an die Hydrophobine beispielsweise Antikörper für Schnittstellenanwendungen von Sensoren anzuknüpfen.

Darüber hinaus könnten synthetische biomimetische Varianten hergestellt werden, bei denen kleine Partikel verwendet werden, um Größe, Amphiphilität und symmetrische Ausrichtung der Hydrophobine zu imitieren. Dadurch ist es möglich, ähnliche molekulare selbstassemblierende Systeme zu schaffen, um Beschichtungen herzustellen, Grenzflächen zu steuern und Adhäsivität zu erzielen.

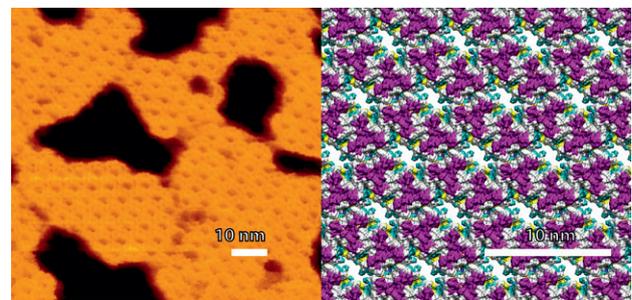


Abbildung 29: Hydrophobin-Proteine bilden außergewöhnlich stabile Filme, wenn sie sich spontan an Grenzflächen zusammenlagern (Quellen: Arja Paananen, VTT Technical Research Centre of Finland (AFM Image links) und Dmitrii Fedorov, Department of Bioproducts and Biosystems, Aalto University (modellierte Struktur, rechts)).



8 Biologisch inspirierte Biomaterialien für medizinische Anwendungen

Prof. Dr. Carsten Werner

Leibniz-Institut für Polymerforschung, Dresden

Biomaterialforschung als noch relativ junge, an der Schnittstelle von Materialwissenschaft, Biologie und Medizintechnik angesiedelte Disziplin kann in besonderer Weise vom rasanten Wissensgewinn der Lebenswissenschaften profitieren. Biomaterialien sind nicht-lebende Materialien, die in Medizinprodukten – wie Implantaten, Organersatzsystemen oder massenhaft verwendeten Einwegartikeln – unter direkter Wechselwirkung mit einem lebenden Organismus zum Einsatz kommen.¹⁰³

Das Spektrum der hier genutzten Materialien umfasst Hochleistungswerkstoffe wie Titan, Keramiken, Fluorpolymere, aber auch Massenkunststoffe wie Polyvinylchlorid, Polypropylen und aus natürlichen Quellen isolierte Biopolymere wie Zellulose und Kollagen.¹⁰⁴ Viele Medizinprodukte beruhen auf einer Kombination von verschiedenen Biomaterialien. Fundamentale Auswahlkriterien für Biomaterialien sind die prinzipielle Eignung für den sicheren Einsatz in Medizinprodukten und die Gewährleistung der Funktion des Produkts – auch nach Sterilisation und Lagerung. Zu den Funktionen gehören etwa eine mechanische Unterstützung des Bewegungsapparats oder die Trennleistung von Membranen in extrakorporalen Organersatzsystemen. Gleichzeitig müssen unerwünschte Nebenwirkungen der Materialanwendung vermieden werden: In diesem Zusammenhang sind nicht nur toxische oder cancerogene Wirkungen auszuschließen, sondern auch materialassoziierte Infektionen und Fremdkörper-Abwehrreaktionen des Organismus so weit wie möglich zu verhindern. Hierfür wurde als zentrale Anforderung der Begriff der produkt- beziehungsweise anwendungsspezifisch zu

bewertenden Biokompatibilität von Materialien geprägt. Um Biokompatibilität zu gewährleisten, ist die Gestaltung der Grenzflächeneigenschaften von Biomaterialien besonders wichtig. Laut Medizinproduktegesetz sind alle Medizinprodukte vor ihrem Inverkehrbringen Prüfungen zu unterziehen, zu denen der Nachweis der Biokompatibilität der verwendeten Materialien für jede spezifische Anwendung gehört. Eckpunkte der dabei erforderlichen Tests der biologischen Materialverträglichkeit sind in der Normenreihe EN ISO 10993 definiert.

In jüngster Zeit geht die Biomaterialforschung über die Adaption verfügbarer Materialien hinaus und wird vor allem durch die Erkundung regenerativer Therapien stimuliert, die durch den Erkenntnisfortschritt in der molekularen Zellbiologie möglich geworden sind.¹⁰⁵ Besonders großes Potenzial besitzen Therapien mit Stamm- und Vorläuferzellen – vor allem bei bisher nicht oder nur unbefriedigend behandelbaren Erkrankungen, wie neurodegenerativen Krankheiten, Diabetes, Wundheilungsstörungen sowie Erkrankungen des Herz- und Kreislaufsystems. Bei der Materialentwicklung für regenerative Therapien wird immer mehr Bezug auf biologische Kommunikationsprozesse und Bauprinzipien lebender Materie genommen: Um Regenerationsprozesse durch Biomaterialien gezielt aktivieren zu können, ist es erforderlich, zelluläre Prozesse durch spezifische molekulare Interaktionen zu steuern und Materialeigenschaften dynamisch an die Gewebebildung anzupassen. Für diese Zwecke werden auf Biopolymeren beruhende Matrixsysteme (zum Beispiel dezellulärisierte Gewebe, rekonstituierte Kollagenpräparationen und Mehrkomponenten-Gele wie Matrigel™),^{106, 107} Biohybrid-Materialien (zum Beispiel mit synthetischen Polymeren chemisch modifizierte Proteine und Glykosaminoglykan-Polyethylenglykol-Hydrogele)¹⁰⁸ oder mit bioaktiven Peptiden funktionalisierte synthetische Materialien (zum Beispiel Hydrogele auf Polyethylenglykol-Basis) genutzt.^{109, 110} Generell wird die Entwicklung von Plattformen adaptionsfähiger, multifunktionaler und auch mehrphasiger Biomaterialien angestrebt, für deren Etablierung – aufbauend auf der Verfügbarkeit additiver Fertigungsverfahren (siehe auch Kapitel 3) – zunehmend kombinatorische Methoden herangezogen werden. Dadurch können etwa polymerbasierte Materialien identifiziert werden, die für die effektive Kontrolle von Zellschicksalsentscheidungen humaner Stammzellen oder

103 | Vgl. European Society for Biomaterials 1987.

104 | Vgl. Murphy et al. 2016.

105 | Vgl. Green/Elisseeff 2016.

106 | Vgl. Singelyn/Christman 2010.

107 | Vgl. Prewitz et al. 2013.

108 | Vgl. Freudenberg et al. 2016.

109 | Vgl. Lutolf/Hubbell 2005.

110 | Vgl. Place et al. 2009.

für die Ausstattung von Oberflächen mit antimikrobiellen Eigenschaften geeignet sind.^{111, 112, 113, 114} Die gezielte Modulation des Immunsystems mithilfe von Biomaterialien^{115, 116, 117} – häufig in Form von Partikeln – stellt einen vielversprechenden Ansatz für neuartige Krebstherapien sowie die Behandlung von Krankheiten dar, die mit chronischen Entzündungen assoziiert werden.

Bei der Formgebung von Biomaterialien für regenerative Therapien werden oftmals neue Methodiken entwickelt oder adaptiert, woraus sich Optionen für die Personalisierung von Medizinprodukten ergeben, das heißt, dass Produkte an patientenspezifische Anforderungen angepasst werden können: Neben injizierbaren Materialien in Form von *in situ* assemblierenden Systemen kommen makroporöse und mehrphasige Materialien ebenso zum Einsatz wie Strukturen, die durch additive Herstellungsverfahren erzeugt werden. Bei der Auswahl der Materialien spielt es aus diesem Grund eine entscheidende Rolle, ob sich die Materialien für die entsprechenden Formgebungsprozesse eignen.^{118, 119}

Während es bisher in der klinischen Routine noch wenige zell-instruktive Biomaterialien für die therapeutische Anwendung gibt, zeichnet sich für die regulatorisch weniger problematische Anwendung solcher Materialien in diagnostischen Technologien eine relativ rasche Umsetzbarkeit ab – dazu zählen vor allem Gewebe- und Organmodelle, die auf humanen Zellen beruhen. Ziel ist hier die realistischere Nachbildung von physiologischen und pathologischen Strukturen *in vitro*, insbesondere für die Entwicklung neuer Wirkstoffe und die Toxizitätstestung, aber auch für mechanistische biologische Untersuchungen zu Erkrankungsprozessen. Die hier zu etablierenden Technologien könnten wertvolle Beiträge zur Individualisierung von Therapien leisten. Dabei stehen aktuell dreidimensionale Organoid-Kulturen im Fokus, die durch multifunktionelle Biomaterialien gesteuert werden. Diese Kulturen basieren oft auf humanen, induziert pluripotenten Stammzellen. Wichtig bei ihrer Entwicklung sind die Steuerung der Skalierbarkeit, die Integration sowie die Konnektivität und die

Reproduzierbarkeit. Die Kombination von Biomaterialien mit etablierten Hochdurchsatzverfahren und mikrofluidischen Systemen verspricht hierfür wertvolle neue Optionen.

Aber auch klinisch bereits gut etablierte Medizinprodukte können erheblich von den neuen Biomaterialien profitieren, die sich stärker an den Prinzipien der lebenden Natur orientieren und die nach den Prinzipien des Tissue Engineering für regenerative Therapien entwickelt werden. Beispiele sind bereits vielfach angewandte Kombinationsprodukte wie etwa Gefäßstützen (Stents), die mit wirkstofffreisetzenden Beschichtungen versehen werden, aber auch biologisch funktionalisierte Gefäßkatheter oder Elektrodenysteme zum Einsatz im Nervensystem.¹²⁰ Neue Materialentwicklungen sind darüber hinaus für die Digitalisierung der Medizintechnik erforderlich, vor allem für die Implementierung von Sensoren und Aktuatoren. Auch hier sind die Kontrolle von Grenzflächenphänomenen und die Gewährleistung der Biokompatibilität oft entscheidend für den Erfolg einer Technologie.

Angesichts der Vielfalt von zu kombinierenden Funktionselementen und biologischen Interaktionsprozessen sind die Methoden der datenbasierten Materialforschung prädestiniert für die Gestaltung von Biomaterialien. Es wird erwartet, dass diesem Gebiet – in Verbindung mit präparativen und analytischen Hochdurchsatzverfahren^{121, 122, 123} – künftig eine zentrale Bedeutung zukommen wird.

8.1 Konzepte für Gewebeersatz und Regeneration

Prof. Dr. Katrin Sternberg und Dr. Detlef Schumann
Aesculap AG, Tuttlingen

Bereits in den frühen siebziger Jahren schuf W. T. Green (Boston Children's Hospital, Boston, MA, USA) die ersten Grundlagen für innovative Ansätze im Bereich der Knorpelrekonstruktion

111 | Vgl. Mei et al. 2010.

112 | Vgl. Beachley et al. 2015.

113 | Vgl. Ranga et al. 2014.

114 | Vgl. Hook et al. 2012.

115 | Vgl. Hubbell et al. 2009.

116 | Vgl. Hotaling et al. 2015.

117 | Vgl. Sadler et al. 2016.

118 | Vgl. Murphy/Atala 2014.

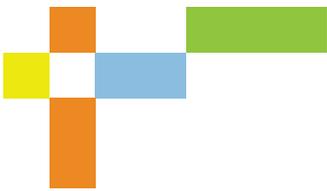
119 | Vgl. Kang et al. 2016.

120 | Vgl. Mineev et al. 2015.

121 | Vgl. Vasilevich et al. 2017.

122 | Vgl. Cranford/Buehler 2012.

123 | Vgl. Vegas et al. 2016.



(Gewebeersatz). Green besiedelte hierfür Knochenfragmente mit Knorpelzellen und implantierte diese in Nacktmäuse. Einige Jahre später folgten vereinzelte Untersuchungen zur Züchtung von Haut und anderen Geweben. Allgemein werden jedoch die Arbeiten von J. P. Vacanti und R. Langer in den achtziger Jahren als Geburtsstunde des klassischen Tissue Engineering betrachtet.¹²⁴ Heutzutage werden die Begriffe Gewebersatz (Tissue Engineering) und Regeneration (Regenerative Medicine) oftmals synonym verwendet. Dennoch gibt es entscheidende Unterschiede zwischen diesen beiden Anwendungsfeldern. Während sich das Tissue Engineering primär auf die Züchtung von Ersatzgewebe außerhalb des Körpers durch die Kombination von lebenden Zellen, geeigneten Trägermaterialien und Wachstumsfaktoren konzentriert, nutzen die regenerativen Ansätze die Selbstheilungskräfte des Körpers und stimulieren diese durch geeignete Einflussfaktoren. Dies können beispielsweise autologe Wachstumsfaktoren wie plättchenreiches Plasma oder Knochenmarkskonzentrat und synthetische Wachstumsfaktoren wie knochenmorphogenetische Proteine sein sowie die gezielte Gewebeheilung durch modifizierte Oberflächenstrukturen und/oder strukturell optimierte Trägermaterialien.

Neben autologen, aus Biopsien gewonnenen Zellen, Blut- und Knochenmarkskonzentraten sowie allogenen Zellquellen, wie zum Beispiel den embryonalen, nabelschnur- oder plazentabasierten Ansätzen, finden inzwischen auch weitere Verfahren große Beachtung. Vielversprechend, aber noch nicht klinisch anwendbar sind unter anderem Verfahren zur Umprogrammierung von Zellmaterial mit dem Ziel, das Differenzierungspotenzial zu steigern – Stichwort: induzierte pluripotente Stammzellen.¹²⁵

Als Trägermaterialien haben sich neben den klassischen kollagenbasierten Produkten weitere xenogene und auch allogene Materialien etabliert, wie zum Beispiel extrazelluläre Matrizen und demineralisierte Knochenmatrizen sowie Kombinationen aus natürlichen und synthetischen Polymeren. Erfolgversprechende Ansätze zeigten auch komplette azelluläre Spendermatrizen, welche nachträglich *in vivo* neu mit patienteneigenen Zellen besiedelt wurden.¹²⁶ Zusätzlich wurden sogenannte *In-vivo*-Bioreaktoren für Biomaterialien und spezifische Gewebeexplantate entwickelt. Solche Explantate können in der Patientin beziehungsweise im Patienten an einer Stelle „vorkultiviert“ und später an die richtige Stelle „umgepflanzt“, also im Wundbereich implantiert werden. Dadurch ist die Gefäßanbindung später besser.

Ein weiterer Bereich der regenerativen Medizin untersucht verstärkt den Einfluss der Biomaterialoberflächen und -grenzflächen auf die Möglichkeiten der gesteuerten Gewebe(ein)heilung und Gewebe(re)differenzierung. Auch hier konnte eine direkte Abhängigkeit zwischen der Oberflächenbeschaffenheit, die von der Zellart bestimmt wird, und dem jeweiligen Differenzierungspotenzial gezeigt werden. Insbesondere die Kombination aus Topografie (zum Beispiel Oberflächenrauheit, Oberflächengestalt) und gezielter, lokalisierter Substitution von Wachstumsfaktoren oder anderen Stimuli könnte für die Regeneration von besonders großflächigen Gewebedefekten, welche eine rasche und durchdringende Gewebearbeitung benötigen, einen geeigneten Ansatz darstellen. Letzteres ließe sich auch hervorragend über neue Verfahren wie Additive Fertigung zur Herstellung von komplexen Strukturen realisieren.

Trotz herausragender wissenschaftlicher Erfolge der vergangenen Jahrzehnte konnten sich sowohl die regenerative Medizin als auch der Gewebersatz noch nicht in dem Ausmaß in der Klinik beweisen wie ursprünglich erhofft. Vor allem große Konstrukte auf Basis synthetischer Polymere zeigten die damit verbundenen Nachteile wie Apoptose und Nekrose aufgrund einer Mangelversorgung mit Nährstoffen und der unzureichenden Abfuhr von bioinkompatiblen, aciden Abbauprodukten (zum Beispiel infolge von Bulkdegradation oder geringer Porosität und Interkonnektivität). Außerdem wurde der Einfluss der Mechanobiologie (Stress Shielding, statischer Druck, kein Druck, zu geringer oder zu starker zyklischer Druck oder Zug) unterschätzt. In den Bereichen Gewebersatz und Regeneration stellt weiterhin die Übertragbarkeit der präklinischen Ergebnisse vom Tier auf den Menschen eine Herausforderung dar. Über die Jahre entwickelten sich immer stärker multidisziplinäre Ansätze, an denen Medizinerinnen, Pharmakologen, Ingenieurinnen, Chemiker und Biologinnen beteiligt sind, um so praxisrelevante Verfahren wie möglich zu entwickeln. Darüber hinaus mussten und müssen die Zulassungsbehörden neue Expertisen aufbauen, um derartige biologische Therapieansätze ausreichend bewerten zu können. Auch die Gesetzgebung wurde und wird noch immer angepasst. Aufgrund der Neuheit, Komplexität und technischen Besonderheiten von Arzneimitteln für neuartige Therapien (Advanced Therapy Medicinal Products, ATMP) waren speziell auf ATMP zugeschnittene und harmonisierte Vorschriften erforderlich. Dadurch konnten der freie Verkehr der ATMP innerhalb der Europäischen Union und das wirksame Funktionieren des Binnenmarktes im Biotechnologiesektor gewährleistet werden. Eine Erstattung durch die Krankenkassen gestaltet sich bis heute schwierig.

124 | Vgl. Vacanti 2006.

125 | Vgl. Loskill/Huebsch 2019.

126 | Vgl. Russell 2014.

Mit wachsendem Erfolg konnten sich bis heute vor allem die Knorpelregeneration und der Hautersatz im klinischen Alltag etablieren. Knorpelgewebe ist besonders geeignet, da humaner Knorpel lediglich aus einer Zellart besteht, nur durch die Gelenkflüssigkeit ernährt wird und sein Gerüst aus Kollagenfasern und Proteoglykanen selbst aufbaut. Co-Kulturen unterschiedlicher Zelltypen sind dagegen eine größere Herausforderung. Automatisierte Herstellungsverfahren, wie sie auch im Kapitel 3 beschrieben sind, werden diese Felder zukünftig noch attraktiver machen. Mit dem 3D-Drucker können mittlerweile hundert Quadratzentimeter Haut in weniger als 35 Minuten hergestellt werden. Die gedruckte Haut ist der menschlichen sehr ähnlich; die Kommerzialisierung dieser Technologie ist geplant.¹²⁷ Auch andere Gewebe, wie zum Beispiel kleine Arterien bis hin zu einer vollständigen Luftröhre, wurden gezüchtet und in Patientinnen und Patienten implantiert. Allerdings stellen letztgenannte Gewebe aus vielerlei Gründen bisher eher den Einzelfall dar. Einerseits sind die Kosten für komplexe Gewebezüchtungen noch immer erheblich. Andererseits konnten positive klinische Langzeitergebnisse bisher noch nicht ausreichend belegt und gewährleistet werden. Herausfordernd sind hierbei vor allem Integration und Einheilung des Geweberegenerats in die native Wunde sowie die Vitalität und Differenzierungsstabilität des Regenerats über einen längeren Zeitraum. Ein geeigneter Lösungsansatz sollte aus diesen Gründen eine rasche Anbindung des Geweberegenerats an das native vaskuläre Netzwerk ermöglichen. Unter anderem sind auch dafür moderne Bioprinting-Verfahren oder andere additive Herstellungsverfahren in Kombination mit innovativen Biomateriallösungen in Betracht zu ziehen (siehe auch Kapitel 3). Die derzeit noch zu hohen Herstellungskosten könnten durch die weitere Automatisierung der Prozesse deutlich reduziert werden und somit den Transfer biologischer Produktlösungen in die Kliniken vereinfachen.

Neue Moleküle, zum Beispiel Traction Force-activated Payloads, stimulieren die Geweberegeneration, indem sie spezifisch körpereigene Zellen befähigen, im Zeitverlauf der Regeneration notwendige autologe Wachstumsfaktoren in der Wunde freizusetzen.¹²⁸

2018 berichtete erstmalig ein israelisches Ärzteteam über seine einzigartigen klinischen Erfolge in der Züchtung und Implantation von Gewebe für die Rekonstruktion von Schienbeinknochen. Die Stammzellen dafür wurden zuvor dem Fettgewebe der Patientin beziehungsweise des Patienten entnommen.¹²⁹

Eine weiteres wichtiges Anwendungsfeld des Tissue Engineering ist die Herstellung dreidimensionaler gewebeähnlicher Zellkonstrukte, an denen die Wirkung von Schadstoffen wie Pestiziden, aber auch die Wirkung von Pharmaka und Kosmetika getestet wird – mit dem Vorteil, dass tierexperimentelle Studien reduziert werden. Möglicherweise findet sich zukünftig eine weitere großvolumige Anwendung in der biotechnologischen Herstellung von In-vitro-Fleisch, um die Nachteile der Massentierhaltung und die damit verbundenen Probleme zu vermeiden.

8.2 Die Rolle des Knochenmaterials bei der Metastasenbildung von Brustkrebs¹³⁰

Prof. Dr. Claudia Fischbach-Teschl

Meinig School of Biomedical Engineering, Cornell University, USA

Brustkrebs bildet häufig Metastasen im Knochen, die dort zu einem osteolytischen Knochenabbau führen und die medizinischen Prognosen verschlechtern. Dennoch mangelt es bisher an therapeutischen Behandlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung dieses Prozesses, da die zugrunde liegenden Mechanismen noch nicht hinreichend erforscht sind. Die meisten aktuellen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die zelluläre und molekulare Signalübertragung, die der Knochenmetastasierung zugrunde liegt. Die Veränderung von Knochenmaterial-eigenschaften könnte jedoch ebenso relevant sein.

Knochen ist ein hierarchisch strukturiertes Nanokomposit aus Kollagenfasern und ausgerichteten carbonathaltigen Hydroxyapatit-Nanokristallen. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Hydroxyapatit, wie Kristallinität, Zusammensetzung, Größe, Aspektverhältnis und Orientierung, können in Abhängigkeit von Knochenerkrankungen, Ernährung und Alter der Patientin beziehungsweise des Patienten, aber auch als Reaktion auf Krebs variieren. In der Tat ist bei Brustkrebs – auch ohne offensichtliche klinische Metastasierung – der Gehalt an Knochenkollagen verringert; der Tumor hemmt die Reifung von Hydroxyapatit-Nanokristallen über systemische Faktoren im Blutkreislauf (siehe Abbildung 30). Diese Erkenntnisse sind von entscheidender funktioneller Bedeutung, da krebsbedingte Veränderungen von

127 | Vgl. Cubo et al. 2016.

128 | Vgl. Stejskalová et al. 2019.

129 | Vgl. Bonus BioGroup 2018.

130 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

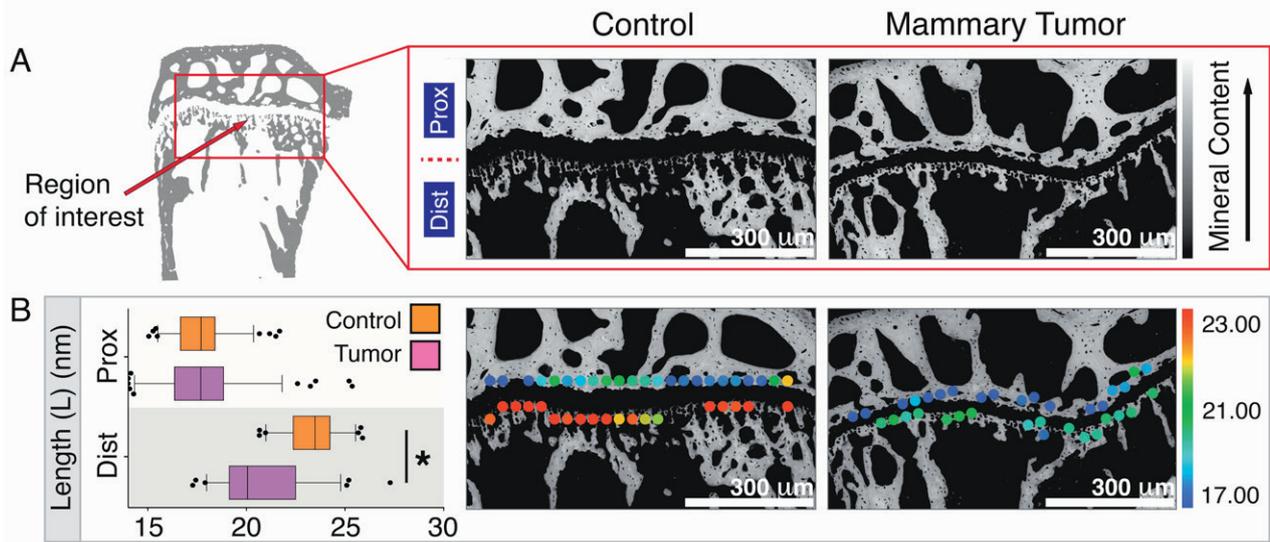


Abbildung 30: Mithilfe von synchrotronbasierten Kleinwinkel- und Weitwinkel-Röntgenstreuungsmethoden können Größe und Ausrichtung von Mineralpartikeln in relevanten Knochenbereichen mit einer Auflösung im Mikrometerbereich abgebildet werden. Diese Techniken haben gezeigt, dass das Vorhandensein eines Tumors in Mäusen (hier bezeichnet als „Mammary Tumor“) zu einer verringerten Hydroxyapatit(HA)-Nanokristall-Reife führt im Vergleich zu Mäusen ohne Tumor (hier bezeichnet als „Control“) – zum Beispiel durch Verringern der HA-Nanopartikel-Länge unterhalb („Dist“), aber nicht oberhalb („Prox“) der Wachstumsfuge, wie in B gezeigt. Solche Veränderungen sind zwar von funktioneller Bedeutung, können jedoch mit herkömmlichen klinischen Bildgebungstechniken nicht erkannt werden (Quelle: He et al. 2017).

Kollagen und Hydroxyapatit nicht nur die einzigartigen mechanischen Eigenschaften des Knochens beeinträchtigen, sondern auch die Ansiedlung der Brustkrebszellen und das Fortschreiten der Krebserkrankung und damit letztlich die Pathogenese von Knochenmetastasen beeinflussen können.

Dennoch besteht immer noch ein allgemein mangelndes Verständnis darüber, wie Knochenmaterialien die Knochenmetastasierung bei Brustkrebs regulieren. Das liegt zum Teil an (i) dem Fehlen hochauflösender Analysetechniken zur Charakterisierung krebserkrankter Veränderungen der hierarchischen Struktur des Knochens und (ii) einem Mangel von In-vitro- und In-vivo-Modellsystemen zur Bewertung der funktionellen Konsequenzen dieser Veränderungen im Zellverhalten. Der Zusammenschluss von Krebsbiologie und Gewebezüchtung mit hochauflösender Strukturanalyse von Knochen und bioinspirierter Materialsynthese ist jedoch vielversprechend. Eine solche

Herangehensweise wird uns die Eigenschaften von Knochenmaterialien und deren Rolle bei Brustkrebs besser verstehen lassen und unsere Einblicke in die Knochenmetastasierung bei Brustkrebs im Großen und Ganzen verändern. Sie wird unsere konventionelle Auffassung, dass die Krankheit ausschließlich durch zelluläre und molekulare Mechanismen ausgelöst wird, infrage stellen. Die aus solchen Studien gewonnenen Erkenntnisse könnten zu neuen therapeutischen Angriffsziele führen, um Knochenmetastasen in Zukunft zu behandeln oder möglicherweise sogar zu verhindern. Besonders relevant werden solche Untersuchungen angesichts der Tatsache, dass auch viele andere Krebsarten, einschließlich Prostatakrebs, auf den Knochen abzielen. Schließlich ist es ebenfalls wichtig, ein gründliches Verständnis darüber zu erlangen, wie sich eine anormale Mineralisierung auf das Zellverhalten auswirkt, um die Sicherheit von Materialien zu gewährleisten, die für Ansätze zur Knochenregeneration entwickelt wurden.

8.3 Elektrosponnen von Biomaterialien als biomimetisches Konzept¹³¹

Dr. Liliana Liverani und Prof. Dr. Aldo R. Boccaccini
Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften (Biomaterialien),
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Der biomimetische Ansatz, um Zellgerüste (Scaffolds) zur Regeneration von Geweben beim Tissue Engineering erfolgversprechend zu designen, basiert auf detaillierten wissenschaftlichen Beobachtungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen über Strukturen und Eigenschaften von biologischen Geweben. Jedes native Gewebe besitzt individuelle morphologische (Porosität, Porengröße und -interkonnektivität, lokale Architektur und (Nano-)Topografie), chemische (Gewebezusammensetzung, biologische Signalmoleküle) und mechanische (Steifigkeit, Gradienten) Eigenschaften. Daher sollte ein bioinspirierter Ansatz für die Herstellung der Zellgerüste damit beginnen, geeignete Biomaterialien und Herstellungstechniken basierend auf den Erkenntnissen der Bionik auszuwählen.¹³²

Das Elektrosponnen ist ein Verarbeitungsverfahren, welches durch das Anlegen eines hohen elektrischen Potenzials eine (niederviskose) Polymerlösung aus einer Düse (Nadel) auszieht und danach auf einem Kollektor deponiert. Dabei entsteht ein Fasergewirr als flächiges und poröses Endprodukt. Das Verfahren ermöglicht die Herstellung von Fasern im Nano- und Mikrometerbereich; dabei wird die faserige Morphologie der extrazellulären Matrix (ECM) von natürlichen Geweben nachgeahmt (Biomimikry). Das Elektrosponnen-Verfahren ist seit über zwanzig Jahren als leistungsstarke und vielseitig einsetzbare Verarbeitungsmethode etabliert, um biomimetische Zellgerüste aus Polymerlösungen zu generieren.¹³³

Neben der intrinsischen Möglichkeit des Elektrosponnens, die extrazelluläre Matrix von nativem Gewebe biomimetisch nachzubilden, die für Anwendungen im Hart- und Weichgewebe-Tissue-Engineering relevant ist, haben jüngste Forschungsergebnisse gezeigt, dass auch nicht toxische (milde) Lösungsmittel verwendet werden können. Dies bringt verschiedene Vorteile mit sich. So

kann die Denaturierung von Proteinen vermieden werden, und es gibt keine potenziell toxischen Lösungsmittelpuren in den resultierenden Gerüsten. Die Sicherheit des Laborpersonals und die Abfallentsorgung sind weitere positive Aspekte im Vergleich zu potenziell toxischen Standardlösungsmitteln.^{134, 135}

Ein Nachteil dieser Methode besteht allerdings darin, dass eine verminderte Zellinfiltration in elektrosponnene Fasergerüste beobachtet wurde.¹³⁶ Diese Einschränkung könnte durch Änderungen im Herstellungsprozess und zusätzliche Maßnahmen beseitigt werden, etwa durch die Verwendung strukturierter Kollektoren, die Auswaschung von im Prozess zugesetzten Salzen als Makroporenbildner, durch Aufschäumen mit Gas oder das Aufbringen sogenannter Opferpolymere mit einem koaxialen Nadelsetup. Die Möglichkeit, Makroporen in nano- beziehungsweise mikrometrischen Fasern zu generieren – kombiniert mit den Fähigkeiten, die Faserorientierung zu steuern und faserartige Gerüste aus einer Kombination verschiedener Materialien herzustellen (zum Beispiel Nanopartikel in Fasern, organisch-anorganische Hybridsysteme, Polymermischungen, arzneimittelhaltige Polymere etc.) –, hat zu einem erweiterten Anwendungsbereich und zu einer höheren Qualität der hergestellten Gerüste beigetragen (siehe Abbildung 31).

In den letzten Jahren wurde das Elektrosponnen zur Herstellung nanofasriger Zellgerüste für ein breites Spektrum von biomedizinischen Anwendungen eingesetzt. Einige der gefertigten Produkte sind bereits im Handel erhältlich, unter anderem ballonexpandierbare Stentsysteme, Gefäßzugangstransplantate und synthetische Knochenersatzmaterialien. Hauptanwendungsgebiet ist dennoch das Tissue Engineering, zum Beispiel von Knochen an der Grenzfläche zwischen hartem und weichem Gewebe (osteochondrale Segmente, Knochen-Bänder- und Knochen-Sehnen-Grenzflächen), von Herzmuskelgewebe und von vaskulären Strukturen. Bei Letzteren wird angestrebt, mithilfe mehrerer Schichten 3D-Gefäße zu erzielen, welche die native Struktur menschlicher Blutgefäße nachbilden. Auch Zellgerüste für die Nervenregeneration, Wundauflagen und dermale Verbände, 3D-Gerüste für die Regeneration des Trachealgewebes, Membranen für die Hornhaut des Auges und neuerdings auch für die Gewebezüchtung der Fortpflanzungsorgane¹³⁷ spielen eine Rolle. Wenn bioaktive Moleküle und medizinische Wirkstoffe in die

131 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

132 | Vgl. Seidi et al. 2011.

133 | Vgl. Liao et al. 2006.

134 | Vgl. Liverani et al. 2019a.

135 | Vgl. Liverani et al. 2019b.

136 | Vgl. Seidi et al. 2011.

137 | Vgl. Liverani et al. 2019b.



Fasern eingebracht werden, führt dies zu multifunktionalen Gerüsten mit der Fähigkeit, Wirkstoffe freizusetzen. Ein Beispiel sind antibakterielle Faserstrukturen zur Bekämpfung bakterieller Infektionen. Darüber hinaus verbessert die Zugabe von bioaktiven (Nano-) Partikeln die Eigenschaften von Fasern. Dabei muss das Verhältnis

Partikelgröße zu Faserdurchmesser entsprechend gewählt werden, um den gewünschten Effekt zu erhalten, zum Beispiel eine mechanische Verstärkung oder eine verbesserte Exposition der aktiven Partikel auf der Faseroberfläche, um die Ionendiffusion oder die Arzneimittelabgabe zu optimieren.¹³⁸

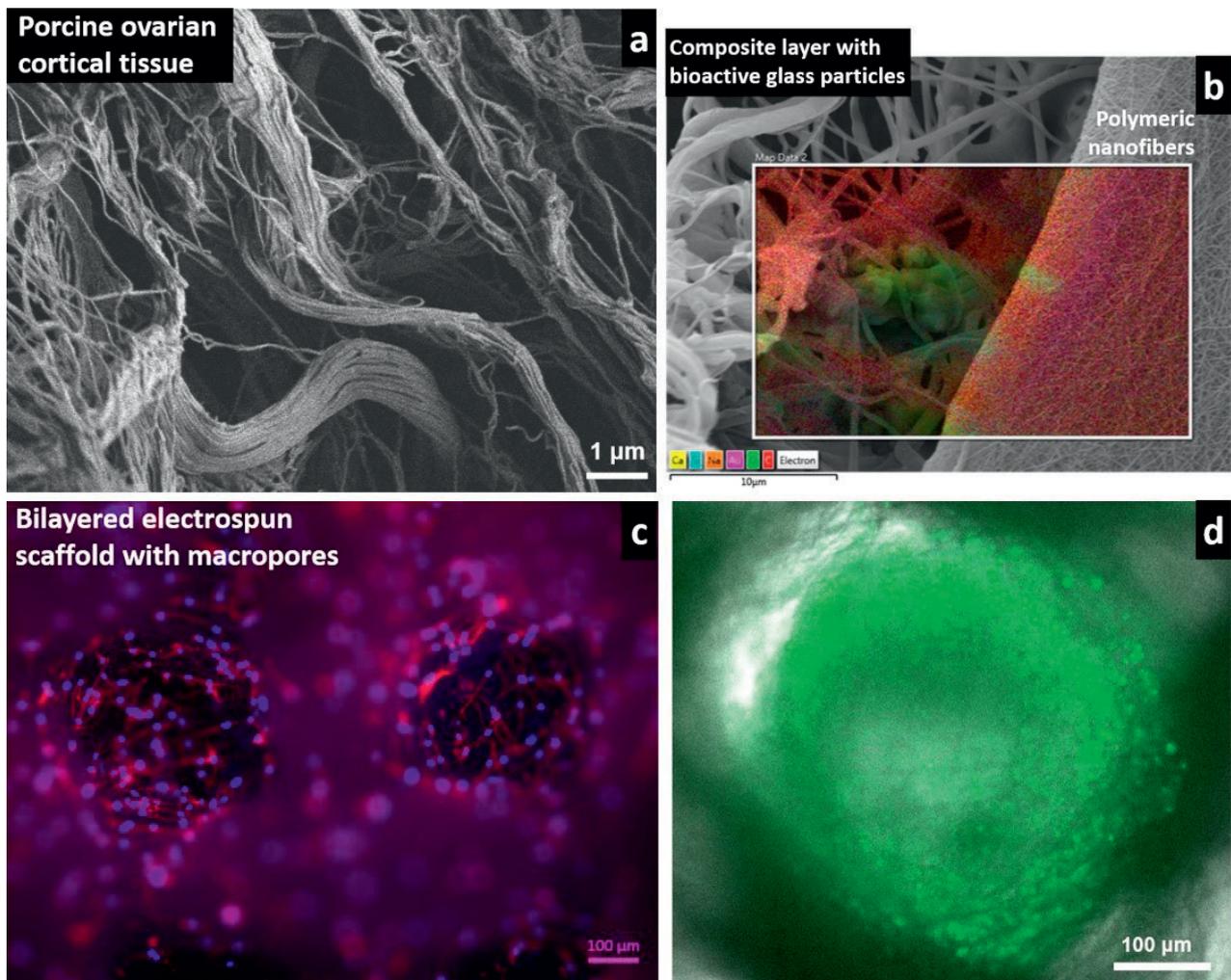


Abbildung 31: Biomimetische Ansätze auf der Basis von Elektrospinn-techniken: (a) REM-Aufnahme von kortikalem Ovarialgewebe vom Schwein; (b) REM/EDX-Analyse eines zweischichtigen elektrogesponnenen Zellgerüsts mit einer polymeren Nanofaserschicht und einer zusammengesetzten Faserschicht, die bioaktive Glaspartikel enthält; (c) mit Zellen besiedelte zweischichtige strukturierte Gerüste zeigen eine Zelleninfiltration innerhalb des Gerüsts¹³⁹; (d) konfokale Abbildung eines Polycaprolacton(PCL)-strukturierten Zellgerüsts mit Ovarialfollikeln vom Schwein (Quelle: Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften (Biomaterialien), Universität Erlangen-Nürnberg; a-c: Aldo R. Boccaccini; d: Aldo Leal-Egana)

138 | Vgl. Tong et al. 2010.

139 | Vgl. Liverani et al. 2019a.

8.4 Biologisierte Medizinprodukte für die Blutbehandlung

Dr. Markus Storr

Gambro Dialysatoren GmbH, Baxter International Inc.

Medizinprodukte, die sich derzeit in der klinischen Praxis für die extrakorporale Blutbehandlung befinden, sind auf biopassive Module beschränkt. Diese entfernen auf Basis von Membrantransport- oder Adsorptionsmechanismen pathogene Zielmoleküle aus dem Blutkreislauf. Derartige Module finden heute zum Beispiel Einsatz in der chronischen und akuten Nierenersatztherapie, in Organunterstützungssystemen, wie Leber- und Lungenunterstützungssystemen, oder bei der Plasmapherese zur Behandlung von Autoimmunerkrankungen oder schwerer Hypercholesterinämie. Meist jedoch erfordert die Komplexität der dabei adressierten Erkrankungen eine Kombination aus extrakorporaler Blutbehandlung mit Medizinprodukten und medikamentöser Therapie. Häufig werden die erforderlichen Wirkstoffe über Infusionstherapien verabreicht.

Um die dabei bestehenden Anforderungen effizienter zu erfüllen, beschäftigt sich Gambro mit neuartigen, innovativen Ansätzen zur Kombination von Wirkstofftherapie und mechanischer Blutbehandlungstherapie. Dazu werden die Wirkstoffe kovalent auf die blutkontaktierenden Oberflächen und Polymermaterialien der Blutbehandlungsmodule gekoppelt, wie zum Beispiel auf Dialys membranoberflächen, und müssen damit nicht mehr in gelöster Form in den Blutkreislauf infundiert werden. Die Wirkstoffanbindung an die Oberflächen verhindert beziehungsweise

verlangsamt den Abbau wie auch die Metabolisierung der Substanzen – das findet vor allem in der Leber oder anderen Organen statt – und führt somit zu einer deutlichen Erhöhung der Wirkstoffstabilität und damit zu einem verbesserten pharmakokinetischen Profil des Wirkstoffs. Um einen vorgegebenen mittleren Wirkstoffspiegel zu erzielen, werden deutlich niedrigere Wirkstoffmengen erforderlich. Da durch diesen Ansatz keine Wirkstoffexposition von Organen und Geweben stattfindet, wird das Toxizitätsrisiko der Verbindungen deutlich verringert, was wiederum den Einsatz höherer und effektiverer Wirkstoffmengen ermöglicht. Damit hat das Konzept auch ein hohes Potenzial, Nebenwirkungen therapeutischer Regime deutlich zu reduzieren. Bei geeigneten Materialbehandlungstechnologien kann zudem auf den Oberflächen ein Mikromilieu geschaffen werden, das für die Aktivität des Wirkstoffs optimiert ist (zum Beispiel hinsichtlich der elektrischen Ladung oder des pH-Werts).

Dieses Konzept der Biologisierung von Medizinprodukten wird von Gambro derzeit exemplarisch anhand eines neuartigen Therapiekonzepts zur extrakorporalen Blutbehandlung erforscht: Eine rein physikalische Blutbehandlung mittels Filtervorrichtungen wird hierbei mit pharmakologischen Wirkstofftherapien kombiniert. Dabei wird ein antiinflammatorisch wirkendes Enzym auf polymeren Dialys membranoberflächen immobilisiert. Diese Membranen werden heute in der kontinuierlichen Nierenersatztherapie bei akutem Nierenversagen (ANV) eingesetzt. Als Wirkstoff wird alkalische Phosphatase verwendet. Eine kürzlich publizierte Studie an 301 Patientinnen und Patienten mit septischem akutem Nierenversagen zeigte, dass die wiederholte intravenöse Applikation dieses Enzyms zu einer signifikant besseren Überlebensrate der Betroffenen führte als

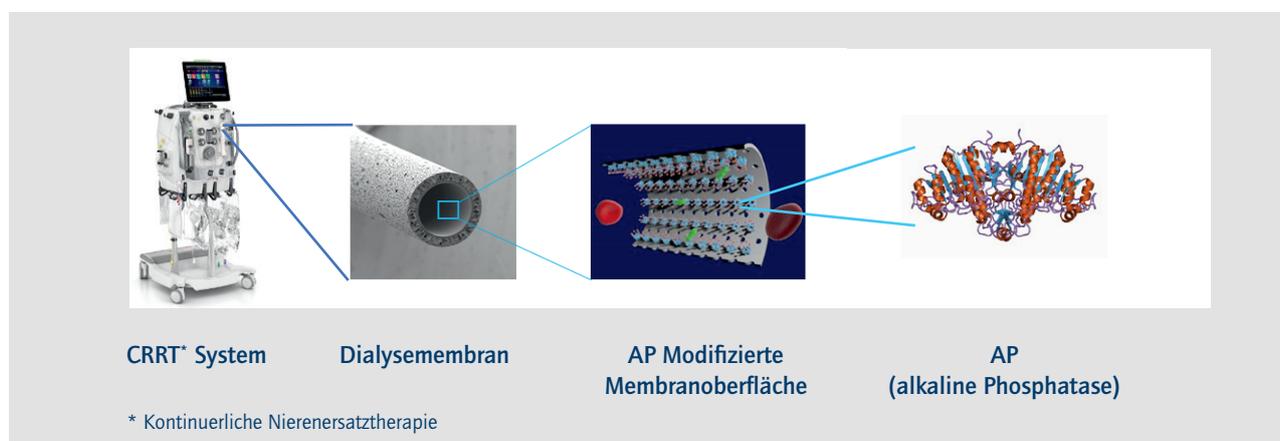
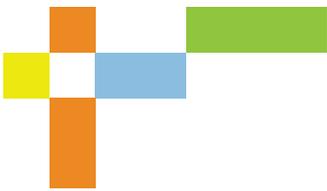


Abbildung 32: Therapiesystem zur kontinuierlichen extrakorporalen Blutbehandlung von septischem akutem Nierenversagen mit an Materialoberflächen gekoppeltem Wirkstoff (Quelle: Baxter International Inc.)



die Gabe eines Placebos.¹⁴⁰ Pharmakokinetische Untersuchungen an gesunden Probandinnen und Probanden belegen allerdings, dass bei intravenöser Gabe die Konzentration der Phosphatase im Blut schon nach 4 Stunden auf unter 10 Prozent der initialen Peak-Konzentration abgefallen ist.¹⁴¹ Deshalb mussten relativ hohe Infusionsdosen gewählt werden, um kontinuierlich über der therapeutisch wirksamen Minimalkonzentration des Enzyms im Blutspiegel zu bleiben. Die Anbindung der alkalischen Phosphatase auf die Membranoberfläche des Dialysemoduls, welches bei diesen Patientinnen und Patienten zur kontinuierlichen Substitution der Nierenfunktion zum Einsatz kommt, würde den Abbau des Wirkstoffs dagegen erheblich verringern, wodurch deutlich geringere Wirkstoffmengen im Vergleich zur intravenösen Gabe benötigt würden. Die Phosphatase soll dabei so gekoppelt werden, dass die biologische Aktivität aufrechterhalten bleibt. Diese Aktivität beruht auf der Dephosphorylierung von Substraten im Blut (zum Beispiel Lipopolysaccharide, Adenosintriphosphat). Zudem sollen die Materialoberflächeneigenschaften an die optimalen Milieubedingungen der Phosphatase angepasst werden, die ihre maximale Aktivität im alkalischen pH-Bereich aufweist.

Das beschriebene innovative Konzept, Blutbehandlungsmodule und pharmazeutisch wirksame Verbindungen in einem einzigen Medizinprodukt mit biologisch aktiver Funktion zu kombinieren, verspricht auch in vielen weiteren therapeutischen Feldern ein vorteilhafter Ansatz zu sein.

8.5 Das bionische Ohr – Wiederherstellung des Hörvermögens durch biologisierte Technik

Prof. Dr. Thomas Lenarz
Medizinische Hochschule Hannover, Hannover

Bei hochgradigem und an Taubheit grenzendem Hörverlust liegt ein Ausfall der Hörsinneszellen vor. Diese können funktionell teilweise durch eine elektronische Reizprothese, ein sogenanntes Cochlea-Implantat, ersetzt werden. Das Implantat übernimmt den natürlichen Transformationsprozess, bei dem akustische Informationen in Nervenaktionspotenziale umgewandelt werden.

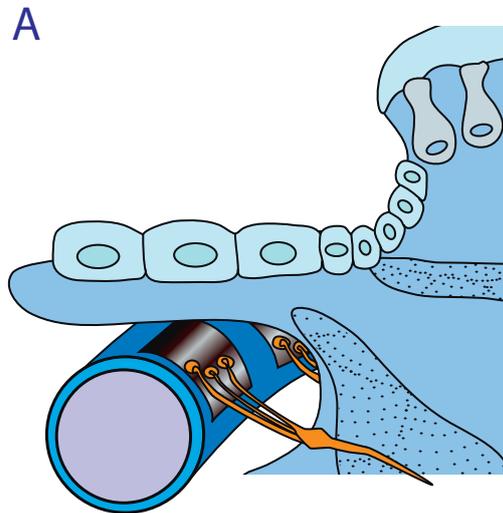


Abbildung 33: Elektroden-Gewebe-Schnittstelle – gewünschtes Dentrifenwachstum aus den Spiralganglienzellen auf die Elektrode (Quelle: Theodor Doll, Thomas Lenarz, Medizinische Hochschule Hannover, HNO-Klinik)

Die Hörnervenfasern werden durch eine mehrkanalige Elektrode angeregt, die in das Innenohr nahe an den Hörnerven eingeführt wird. Der heutige Stand der Technik erlaubt damit ein Sprachverstehen in Ruhe, jedoch nur eingeschränkt im Störgeräusch. Musikhören ist häufig nicht möglich.¹⁴² Wesentliche Ursachen hierfür sind die eingeschränkte Zahl elektrisch getrennter Kanäle – der Abstand zu den Hörnervenfasern und -zellkörpern ist zu groß – sowie eine Fibroblasten-Ummantelung der Reizelektrode, die entsprechend isoliert.¹⁴³

Durch Biologisierung sollen diese fundamentalen Limitationen überwunden werden. Ziel ist die direkte Verknüpfung der elektrisch leitenden Kontakte durch eine Mehrkanalelektrode mit einzelnen Nervenfasern, wodurch mehrere Hundert elektrisch getrennte Übertragungskanäle realisiert werden.¹⁴⁴

Folgende Einzelschritte sind dabei denkbar:

- Die Funktionalisierung der Oberfläche durch geeignete Mikro- und Nanostrukturen zum selektiven Zellaufwuchs (Fibroblasten werden weggehalten, periphere Nervenendigungen,

140 | Vgl. Pickkers et al. 2018.

141 | Vgl. Peters et al. 2016.

142 | Vgl. Lenarz 2017.

143 | Vgl. Campbell/Wu 2018.

144 | Vgl. acatech 2017.

sogenannte Dendriten, können aufwachsen).¹⁴⁵ Ferner ist eine degradable Polymerbeschichtung denkbar, aus der pharmakologische Wirksubstanzen freigesetzt werden, welche diesen zellselektiven Prozess unterstützen und das Insertionstrauma supprimieren. Zu nennen sind hier antiinflammatorische Substanzen sowie Nervenwachstumsfaktoren wie der Brain Derived Nerve Growth Factor (BDNF).

- Die Zellularisierung der Elektrode durch geeignetes Besiedeln der Oberfläche mit programmierten Fibroblasten oder Stammzellen. Beide sind in der Lage, die Autoproduktion der Nervenwachstumsfaktoren dauerhaft wiederherzustellen und so die Regeneration der peripheren Nervenendigungen zu induzieren, die auf die funktionalisierte Elektrodenoberfläche aufwachsen und dauerhaft kontaktieren.
- Die teilweise Befüllung des flüssigkeitsgefüllten Innenohrs mit einer extrazellulären Matrix zwischen Elektrode und Neuronenzelle sorgt für die Ernährung der aufgebrachten Zellen und ist als Leitschiene für das regenerative Nervenwachstum erforderlich.
- Das Aufbringen geeigneter Reservoirs zum Freisetzen von Nanopartikeln, zum Beispiel sogenannten Adeno-assoziierten Viren (AAV) für den Transport genetischer Informationen, die in die Zielzellen (residuale Hörsinneszellen oder Hörnervenzellen) eingeschleust werden. Sie dienen zur somatischen Gentherapie, um die Progredienz des Hörverlusts zu stoppen, und gegebenenfalls auch zur Regeneration der Hörsinneszellen.

Diese vier Schritte setzen intensive Materialforschung voraus, um innovative Werkstoffe zu entwickeln und zu bearbeiten, die die Schnittstelle zwischen Technik und Biologie darstellen.¹⁴⁶

Dieses bionische Ohr mit einer deutlich höheren Zahl von Informations- und Übertragungskanälen wird in der Lage sein, ein nahezu natürliches Hörvermögen wiederherzustellen – sowohl bei prälingualer Taubheit (Kinder) als auch bei postlingualer Ertaubung (Erwachsene) – und somit die klinischen Ergebnisse wesentlich verbessern.

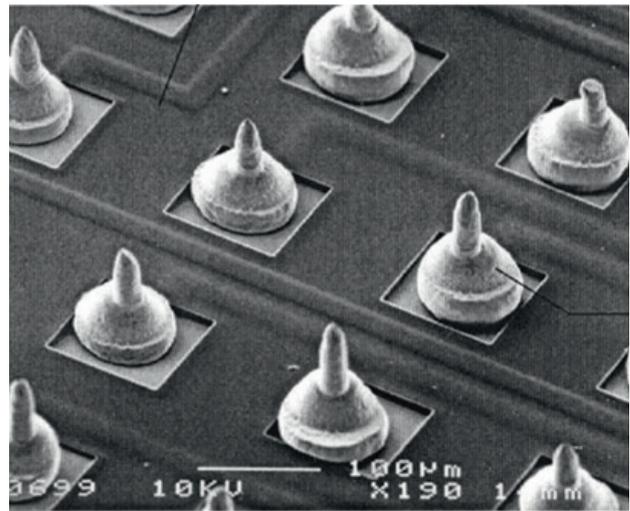
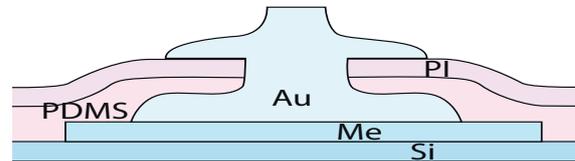


Abbildung 34: Elektroden-Gewebe-Schnittstelle – Fertigung neuronaler Implantate: Stud-ball-Technik für die Fertigung flexibler Elektroden mit hoher Kanaldichte (Quelle: Thomas Stieglitz, IMTEK – Institut für Mikrosystemtechnik, Universität Freiburg)

8.6 Biologisch inspirierte faserbasierte Strukturen für die regenerative Medizin

Prof. Dr. Chokri Cherif

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, Technische Universität Dresden

Biologisch inspirierte faserbasierte Strukturen für die regenerative Medizin werden am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden (ITM) entlang der gesamten Prozesskette entwickelt: vom Rohstoff bis zur komplex aufgebauten Struktur. Mithilfe textiler Herstellungsverfahren lassen sich auf Grundlage vordefinierter Faseranordnungen komplexe Hybridstrukturen realisieren. Basierend auf Biopolymeren, wie Kollagen, Chitosan oder Seide,

145 | Vgl. McCreery 2004.

146 | Vgl. Glasmacher et al. 2020.

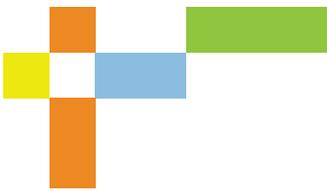


Abbildung 35: Ein durchströmtes geometrisches Strukturmodell einer webtechnisch gefertigten Herzklappe (links), ein integral gefertigter Stentgraft mit in die Prothesenstruktur (Graft) eingewebten Stentringen (Mitte) und eine fluoreszenzmikroskopische Aufnahme einer biologisierten kurzfaserbasierten Zellträgerstruktur (Quelle: Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, Dresden)

und biologisch abbaubaren synthetischen Materialien, wie Polycaprolacton oder Polylactide, werden am ITM Fasermaterialien mit anforderungsgerechten Durchmessern, Festigkeiten und Degradationskinetiken erforscht und entwickelt. Ein zweiter Entwicklungsfokus liegt auf simulationsgestützten Auslegungswerkzeugen, geometrischen Strukturmodellen und numerischen Methoden, die notwendig sind, um patientenindividuelle und gewebespezifische Implantate und Zellträgerstrukturen, sogenannte Scaffolds, für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert auszulegen. Beispiele solcher Implantate und Scaffolds sind unter anderem Gefäßprothesen, Herzklappen, Stentgrafts, Herniennetze oder Zellträgerstrukturen für die Knochen- und die Knorpelregeneration.

Abbildung 35 zeigt ein durchströmtes geometrisches Strukturmodell einer webtechnisch gefertigten Herzklappe (links) und einen Stentgraft (Mitte), der auf Grundlage von Patientendaten integral gefertigt wurde. Im Stentgraft befinden sich Stentringe, die in die Prothesenstruktur eingewebt sind. Dadurch ist sowohl

ein sicherer Blutfluss entlang der vorgegebenen Schlauchgeometrie als auch das Offenhalten des Gefäßes gewährleistet. Auf dem rechten Teil der Abbildung 35 ist eine fluoreszenzmikroskopische Aufnahme einer biologisierten kurzfaserbasierten Zellträgerstruktur zu sehen, die mit einem additiven textilen Druckverfahren gefertigt wurde. Die Abbildung zeigt deutlich die erfolgreiche Besiedlung mit knochen- und gefäßbildenden Zelltypen, die die offenporige Struktur einerseits vollständig durchwachsen und andererseits Gefäßstrukturen zur Versorgung der Zellen ausbilden.

Am Institut stehen Reinräume mit modernster Maschinenteknologie und technischer Ausstattung zur Verfügung, um von der Charakterisierung der Ausgangsmaterialien bis hin zur Analyse der Strukturen alle Prozesse durchführen zu können. Zukünftig sollen auch neuartige intelligente Strukturen erforscht werden, die das Zellwachstum und somit die Regeneration von Geweben interaktiv unterstützen.

9 Intelligente Materialsysteme und Künstliche Intelligenz¹⁴⁷

Prof. Dr. Peter Fratzl

**Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung,
Potsdam**

Die Zukunft digitaler Industrieanwendungen erfordert Materialien, die nicht länger lediglich passive Komponenten aktiver Geräte darstellen, sondern selbst als Informationsträger fungieren. In der Tat müssen Informationen, die in intelligenten Materialien gespeichert sind, nicht mehr durch zentrale Informationssysteme digital verarbeitet werden, was sowohl zeit- als auch energiesparend ist. Diese Art von analoger Informationsspeicherung ist ähnlich wie in natürlichen Systemen, wo Strukturen auf allen Längenskalen vom Molekül über das Gewebe bis hin zum Organ und zum gesamten Organismus Informationen für die verschiedensten Aktivitäten bereithalten. Viele Organe, wie Leber, Herz oder Muskeln, arbeiten bis zu einem gewissen Grad autonom, weil die Informationen über die Funktionsweise direkt im Gewebe gespeichert sind. Um einen solchen Ansatz in die Technik zu übertragen, werden jedoch Materialien benötigt, die auf äußere Impulse in wohldefinierter Weise reagieren, sodass Aufgaben hierarchisch in sich wiederholende Operationen unterteilt werden können. Dadurch ist es möglich, dass Teilaufgaben direkt von aktiven Materialien ausgeführt werden; eine (in der Regel digitale) koordinierende Einheit muss lediglich die Steuerung übernehmen.

Nachdem natürliche Systeme eine solche Funktionsweise in Jahrmillionen der Evolution perfektioniert haben, können Konzepte für die Entwicklung aktiver Materialien von ihnen abgeleitet werden, die für diese Art der Informationsspeicherung und -verarbeitung geeignet sind. Wir können zwei allgemeine Konzepte definieren, welche aktive Materialien beschreiben: für Reaktionsfähigkeit und für Anpassungsfähigkeit. Reaktive Materialien ändern ihre Eigenschaften in Abhängigkeit von einem Umgebungssignal. Ein adaptives Material kann diese Reaktion auf den äußeren Stimulus zusätzlich entsprechend einer Regel modifizieren und sich so an die aktuelle Situation anpassen. Ein Beispiel aus der Pflanzenwelt sind feuchtigkeitsempfindliche Samenkapseln: Viele Samenkapseln sind trockene Gehäuse, die

sich unter einer Feuchtigkeitsänderung öffnen oder sogar weiterbewegen. Die Bewegung, die diese Kapseln ausführen, folgt unmittelbar aus der Verteilung und Orientierung der Zellulosefasern im Material. Diese kontrollieren eine Verformung bei Wasseraufnahme und steuern somit die Bewegung. Im technologischen Kontext wurden bereits Metamaterialien, also Materialien mit einer wohldefinierten Struktur (zum Beispiel miniaturisierte Tragwerke oder poröse Materialien), entwickelt. Sie sind in der Lage, ihre Eigenschaften auf Verlangen zu ändern – eine Reaktionsfähigkeit, die zum Beispiel für Sensorik und Aktuatorik relevant werden kann.

Die Anpassungsfähigkeit ist eine komplexere Materialeigenschaft und bisher weit von einer technischen Realisierung entfernt. Hier ist die Antwort des Materials nicht vorprogrammiert, sondern ändert sich selbst durch einen Lernprozess: Die Materialantwort wird korrigiert, bis eine bestimmte Antwort erreicht ist. Diese Adaptivität erfordert eine Rückkopplungsschleife, bei der die Reaktion des Materials gemäß einem typischen Stimulus, dem es ausgesetzt ist, modifiziert wird. Ein typisches Beispiel ist das adaptive Wachstum von Pflanzen oder die Anpassung von Knochen durch Remodellierung. Ist ein Organismus über lange Zeit großen Lasten ausgesetzt, reagiert der Knochen mit einer Verdickung. Wenn diese typische Belastung abnimmt, wird der Knochen langsam resorbiert. Auf diese Weise ist die Reaktion in gewissem Sinne immer „optimiert“. Für Knochen bedeutet dies eine ausreichende Stabilität bei minimaler Masse des Knochens.

Die Inspiration von der Natur wird also den Weg für reaktions-schnelle und anpassungsfähige Materialien und Systeme ebnen. Christoph Eberl vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg beschreibt im Folgenden aktuelle Forschungsergebnisse zu programmierbaren Materialien, die reaktiv, aber noch nicht adaptiv sind (siehe Kapitel 9.1). Michael ten Hompel und Co-Autoren beschreiben den Vorteil verteilter adaptiver Systeme in der Logistik (siehe Kapitel 9.2). Während dies noch immer mithilfe klassischer Ansätze der Künstlichen Intelligenz realisiert wird, kann die Effizienz gesteigert und Energie gespart werden, wenn einige sich wiederholende Aktivitäten direkt in die Materialsysteme ausgelagert werden. Schließlich diskutieren die Autoren Paschalis Gkoupidenis und Paul W. M. Blom die Potenziale von neuromorphen Computersystemen, bei denen Materialien auf eine vom Gehirn inspirierte Weise eingesetzt werden (siehe Kapitel 9.3). Ein Interview mit Henk Jonkers von der Startup-Firma Green Basilisk zeigt schließlich die Möglichkeit der Selbstheilung in alltäglichen Materialien wie Beton (siehe Kapitel 9.4).



9.1 Metamaterialien und Programmierbare Materialien

Prof. Dr. Christoph Eberl

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Metamaterialien und Programmierbare Materialien haben das Potenzial, einen Paradigmenwechsel einzuleiten. Durch das Design ihrer komplexen inneren Struktur können Metamaterialien Eigenschaften gegeben werden, die sie intrinsisch nicht besitzen (zum Beispiel Licht um Personen herumleiten). Programmierbare Materialien gehen darüber noch hinaus: Durch das lokale Design der inneren Struktur aus einem homogenen Material lassen sich Funktionalitäten integrieren, die derzeit nur durch viele Bauteile erzeugt werden können. Dies ermöglicht eine bisher unerreichbare Funktionsintegration bei gleichzeitiger Reduzierung der Bauteilzahl und damit der Systemkomplexität. Mithilfe Programmierbarer Materialien werden auf diese Weise hochintegrierte, funktionale Systeme möglich, und die Abhängigkeit von teuren Rohstoffen wird reduziert. Programmierbare Materialien bieten weiterhin die Möglichkeit einer einfachen Wiederverwertung, da sie im besten Fall aus einem homogenen Material bestehen. Weiterhin kann der Prozess des Zerlegens sogar in die Struktur einprogrammiert werden.

Programmierbare Materialien eröffnen einzigartige Möglichkeiten für neuartige Systemlösungen, bei denen wesentliche Teile der Systemfunktionalität durch das Material selbst bereitgestellt werden. Die Programmierfähigkeit ergibt sich aus einer gezielten Kombination von logischen Elementen (zum Beispiel: Wenn die Kompression in x-Richtung mehr als 5 Prozent beträgt, dann soll die Steifigkeit gleich 10^9 Pascal sein, sonst nur 10^8 Pascal, siehe Abbildung 36), dem Materialspeicher (zum Beispiel bistabile mechanische oder molekulare Zustände) und der Fähigkeit, Funktionen zu verarbeiten (zum Beispiel Querkontraktion als Funktion der Dehnung in x-Richtung). Damit wird es ermöglicht, die Reaktion eines Materials auf ein äußeres Signal oder eine Last einzuprogrammieren. Das Ansprechverhalten des Materials kann dann entweder extern ausgelöst werden (durch das Anlegen eines elektrischen Felds oder indem man auf eine bestimmte Stelle drückt), oder das Programmierbare Material kann sich beispielsweise automatisch und vorab an veränderte Bedingungen anpassen.

Das Anwendungspotenzial für Programmierbare Materialien ist immens: Programmierbare Porengrößen ermöglichen selbstreinigende Membranfilter für Wasseraufbereitungssysteme,

Materialien mit programmierbarem Wärmedurchgang sorgen für energieeffizientes Wärmemanagement in Maschinen oder Gebäuden, mit programmierbarer Reibung können Kupplungs- und Positioniersysteme intelligent gesteuert werden, und programmierbare, geschwindigkeitsabhängige Formänderungen können Strukturen aerodynamisch oder fluiddynamisch anpassbar machen (zum Beispiel wie bei Delfinen).

Logische Operationen ausführen:
z. B. **strukturelle** und **physikalische**
Eigenschaftänderungen

Wenn Kompression $\chi > 5\%$
dann Steifigkeit = 10^9 Pa
sonst Steifigkeit = 10^8 Pa

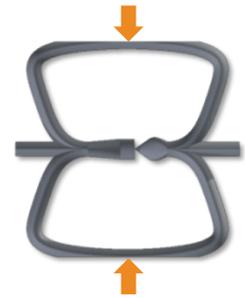


Abbildung 36: Die Einzelemente können durch ihre innere molekulare oder mesoskopische Struktur befähigt werden, auf äußere Belastungen (Pfeile) zu reagieren. Gezeigt ist ein Einzelement, das so entworfen ist, dass es bei leichter Belastung weich wie Schaumstoff und bei hoher Belastung steif wie Holz werden kann (Quelle: Matthew Berwind, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM/Universität Freiburg).

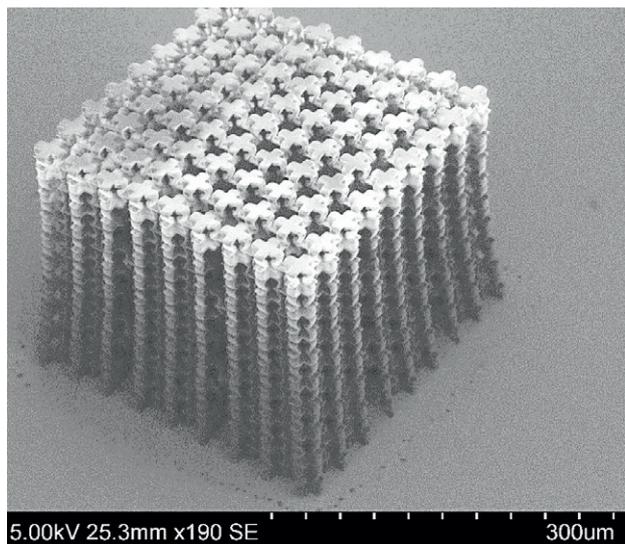


Abbildung 37: Mechanische programmierbare Metamaterialien bestehen aus vielen Einzellementen, die in einem konzertierten Zusammenspiel Systemfunktionen ausführen können (Quelle: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM).

Voll funktionsfähige programmierbare Materialien erfordern eine Kombination von Kompetenzen im Materialdesign, bei der Herstellung komplexer Bauteile und bei der Produktentwicklung. Beim Materialdesign müssen intelligente Materialien mit mechanischen und optischen Metamaterialien kombiniert werden. Die Prozesstechnologie muss die Herstellung architekturnierter Materialien beherrschbar machen, zum Beispiel durch Additive Fertigung oder Blechumformung. Um das volle Potenzial auszuschöpfen, ist nicht zuletzt ein hochgradig interaktiver, interdisziplinärer Prozess beim Anwendungsdesign notwendig.

Programmierbare Materialien können einen Paradigmenwechsel im Umgang mit Materialien einleiten, indem sie technische Multimaterialsysteme, bestehend aus beispielsweise Sensor, Regler, Aktuator und Energieversorgung, durch ein einzelnes, lokal konfiguriertes System ersetzen. Der Schlüssel dazu ist das programmierbare Design der inneren Struktur – etwas, was die Natur in unvergleichlicher Art und Weise beherrscht.

9.2 Chancen und Grenzen einer biointelligenten Wertschöpfung in der Logistik

Prof. Dr. Michael ten Hompel, Christian Prasse und Andreas Nettsträter
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund

Bereits vor mehr als einem Jahrzehnt hat die Logistikforschung damit begonnen, biologische Phänomene wie die Schwarmintelligenz zur Entwicklung innovativer Logistiklösungen zu nutzen. Mit den jüngsten Erkenntnissen zu biointelligenten Wertschöpfungssystemen lassen sich nun weitere systemische Lösungen aus der Natur ableiten und auf technische (vorwiegend digitale) Systeme übertragen. Die aktuelle Logistikforschung beschäftigt sich derzeit damit, sowohl die Potenziale der Übertragung biologischer Prinzipien auf logistische Systeme zu untersuchen als auch die Grenzen auszuloten, ab denen eine Adaption biologischer Verfahren und Methoden nicht mehr sinnvoll möglich ist.

Ausgangspunkt für diese Überlegungen ist eine systematische Gliederung von Logistik und Produktion in biologische Äquivalente: das sogenannte Ebenenmodell (siehe Abbildung 38). Dabei werden logistische Funktionsbereiche beziehungsweise Systemkategorien und biologische Strukturen beziehungsweise Wirkungsgefüge einander mit dem Ziel gegenübergestellt, die

Möglichkeiten der Übertragung bioäquivalenter Verfahren gezielter zu untersuchen:

- Auf der untersten Ebene steht das „Protozoon“ als Träger des Genoms. Übertragen auf Logistiksysteme finden sich hier Entitäten, die mit einem Set an Eigenschaften und Fähigkeiten bestimmte Funktionen innerhalb eines „Habitats“ ausführen können.
- Auf der zweiten Ebene, dem „Habitat“, agieren die Protozoen als Kollektiv und erfüllen ein gemeinsames Ziel, beispielsweise die Suche nach Futter. In der Logistik lassen sich Habitate durch ein örtlich begrenztes (Bereich eines Lagers oder eines Betriebs), aber auch funktionsübergreifendes Aufgabenspektrum (zum Beispiel Transportieren, Greifen, Sortieren, Kommissionieren, Verhandeln etc.) charakterisieren.
- Die dritte Ebene, das „Biotop“, fasst mehrere Habitate zusammen. Das Biotop entspricht verschiedenen Fabriken, Lagerstandorten oder Montagewerken in Logistik und Produktion.
- Das „Ökosystem“ schließlich, die vierte Ebene, findet in der Logistik in globalen Wertschöpfungsnetzwerken bestehend aus zahlreichen Lieferanten, Produzenten, Logistikdienstleistern und Kunden sein Pendant.

In der Logistik sind aus der Biologie übertragene Verfahren heute insbesondere in den unteren beiden Ebenen vertreten. Auf Ebene des „Protozoons“ und des „Habitats“ imitieren etwa flexible Transportfahrzeuge in Schwärmen Ameisen und deren Organisationsprinzipien (siehe Abbildung 39). In den oberen beiden Ebenen gibt es dagegen keine Entsprechungen von Logistik und Biologie. Es scheint zwischen dem „Habitat“ und dem „Biotop“ eine Grenze der Übertragbarkeit zu geben (siehe Abbildung 38: rote Linie), ab der eine Adaption biologischer beziehungsweise natürlicher Verfahren und Methoden auf die Logistik nicht mehr sinnvoll möglich ist.

Vom logistischen Standpunkt aus gesehen markiert der Übergang vom „Habitat“ zum „Biotop“ die Stelle, an der strategisches und zielgerichtetes Gestalten, Planen und Organisieren gefragt ist. Als Beispiel kann hier die Herstellung eines komplexen Produkts genannt werden, die über mehrere Unternehmen hinweg, also habitatübergreifend, erfolgen muss. Abstimmung und Optimierung der Unternehmen untereinander müssen dabei einem strategischen Ziel folgen. Die Biologie kann der Logistik auf dieser Ebene keine Vorbilder anbieten. Denn: Die Natur kennt keine über den Erhalt der Art hinausreichenden strategischen Ziele (es sei denn, diese seien uns noch nicht bekannt). Dies gilt auch für die Ebene des Ökosystems, in der noch komplexere gemeinsame strategische Ziele in Wertschöpfungsnetzwerken verfolgt werden.

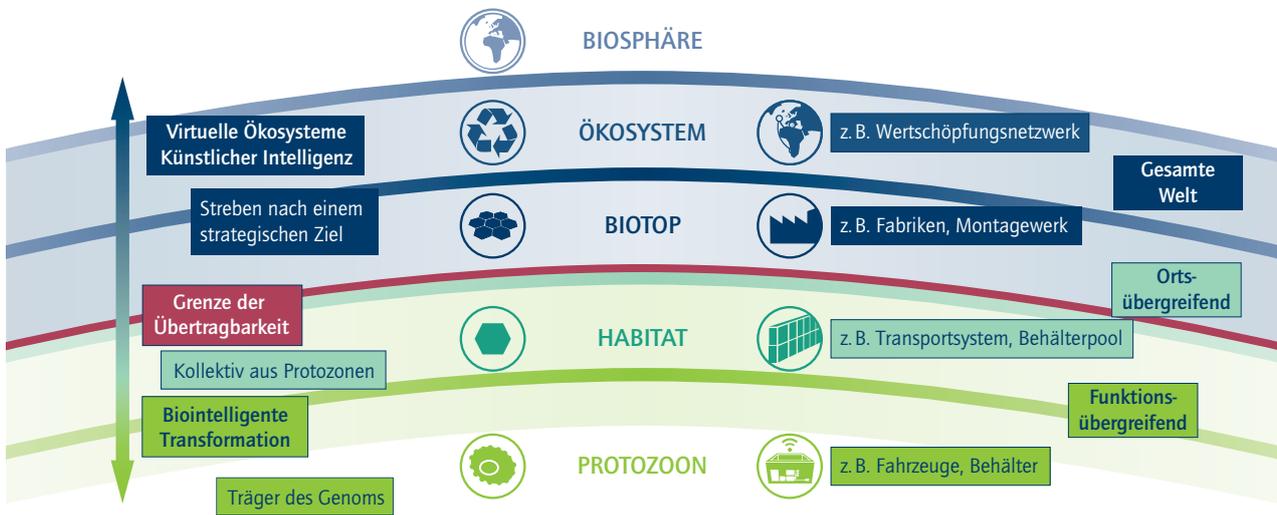


Abbildung 38: Biointelligente Logistik als agiles Wertschöpfungsökosystem (Quelle: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML)

So vielversprechend die Übertragung biologischer Prinzipien auf der Ebene von „Protozoon“ und „Habitat“ ist, so muss die Logistik auf den Ebenen von „Biotop“ und „Ökosystem“ jedoch nach anderen Lösungen suchen. Algorithmen Künstlicher Intelligenz (KI) adressieren per Definition zugehörige Themen der Gestaltung, Planung, Organisation etc. und erscheinen nach heutigem Stand der Forschung geeignet, um zugrunde liegende Informationen zu analysieren und „vernünftige“ Entscheidungen abzuleiten oder zu unterstützen. Folgt man dieser Vorstellung, so werden zukünftig hoch verteilte Systeme Künstlicher Intelligenz

in einem „Ökosystem“ existieren, verhandeln, disponieren, lernen und produzieren. KI folgt damit dem Ziel einer systemübergreifenden, multi-kriteriellen Optimierung im Sinne eines neuen, biointelligenten Supply Chain Management. Vor diesem Hintergrund sollte die Logistikforschung die Mechanismen von Biologie und Informatik zur Optimierung logistischer Wertschöpfungsnetzwerke gleichzeitig und gleichrangig untersuchen.

9.3 Organische iontronische Elemente für neuromorphes Computing¹⁴⁸

Dr. Paschalis Gkoupidenis und Prof. Dr. Paul W. M. Blom
Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz

Informationsverarbeitung mithilfe softwarebasierter künstlicher neuronaler Netze ist eine wichtige Methode mit enormen Auswirkungen auf unseren Alltag: Das Feld ist allgemein als Künstliche Intelligenz bekannt. Der Ansatz beruht darauf, Algorithmen auszuführen, die neuronale Netze auf einer traditionellen Von-Neumann-Computerarchitektur darstellen. Ein alternativer Ansatz ist die direkte Nachbildung der Funktionsweise des Gehirns mithilfe tatsächlicher elektronischer Geräte und Schaltkreise. Das



Abbildung 39: Zellulares Transportsystem mit dezentraler Multi-Agenten-Steuerung, bei der Softwareagenten die einzelnen Fahrzeuge repräsentieren und die Transportaufträge und -routen autonom verhandeln (Quelle: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML)

148 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

menschliche Gehirn besteht aus ungefähr hundert Milliarden Neuronen, die in einem verwobenen Netzwerk von fast tausend Mal so vielen (10^{14}) Synapsen miteinander kommunizieren. Neuronen sind elektrisch anregbare Zellen, die Informationen sammeln, verarbeiten und übertragen und als Verarbeitungseinheiten des Gehirns gelten. Neuronen sind durch Synapsen in einem komplexen Netzwerk miteinander verbunden, und ihre Verbindungseffizienz (synaptische Plastizität) kann auf verschiedenen Zeitskalen modifiziert werden. Dieses komplexe Netzwerk von Neuronen und Synapsen verleiht dem menschlichen Gehirn einzigartige Eigenschaften wie einen hohen Grad an Parallelität mit inhärenten fehlertoleranten Eigenschaften und einen geringen Energieverbrauch. Diese Eigenschaften machen das Gehirn zu einem idealen Modellsystem für die Implementierung von Informationsverarbeitungsschaltkreisen der Zukunft, die auch als neuromorphes Rechnen (Neuromorphic Computing) bezeichnet werden. Es ist zu erwarten, dass mit solchen neuroinspirierten Verarbeitungsschaltungen Durchbrüche dahingehend erzielt werden, wie Computer künftig Daten analysieren, die reale Umgebung erfassen und mit Menschen interagieren.

In letzter Zeit gewinnen organische elektronische Materialien als Grundlage für neuromorphe Schaltkreise zunehmend an Interesse. Die elektrische Leitfähigkeit vieler organischer Materialien beruht nicht nur auf der Bewegung von Elektronen, sondern auch von Ionen (die entweder während der Synthese in den Film eingebracht oder aus einem Elektrolyten injiziert werden). Aufgrund der starken Kopplung von elektronischen und ionischen

Ladungsträgern in einem einzigen weichen Material wirken diese „iontronischen“ Bauelemente in vielen Fällen als hoch-effiziente Ionen-Elektronen-Wandler und bilden somit eine Schnittstelle zwischen Biologie und Elektronik, die sogenannte organische Bioelektronik. Der Grundbaustein organischer bioelektronischer Schaltungen für neuromorphe Anwendungen ist der organische elektrochemische Transistor (OECT), der Ionsignale in elektrischen Strom umwandelt. In neuromorphen Architekturen, die auf OECTs basieren, können Elektrolyte einzelne Geräte miteinander verbinden, wie in Abbildung 40 gezeigt. Dies ermöglicht die Definition einer parallelen „weichen“ Konnektivität zwischen den Geräten durch das Materialkontinuum sowie ihre globale Steuerung durch eine gemeinsame Elektrode, die die neuronalen Schwingungen im Gehirn nachahmt.

Materialien und Bauelemente, die ein Gedächtnis aufweisen und an der Schnittstelle zur Biologie arbeiten können, werden den Weg für neuartige Datenverarbeitungsparadigmen mit bioinspirierten Merkmalen in der Informationsverarbeitung ebnen. Die Herausforderung besteht darin, organische Geräte und Architekturen zu entwickeln, die in der Lage sind, von Neuronen inspirierte Informationsverarbeitungsfunktionen zu reproduzieren, welche an der Schnittstelle zur Biologie operieren können. Solche Architekturen werden erhebliche Auswirkungen auf Anwendungen haben, die von der Gehirn-Computer-Schnittstelle über Neurowissenschaften, Robotik und Bioinformatik bis hin zur Definition neuartiger Rechenparadigmen an der Schnittstelle zur Biologie reichen.

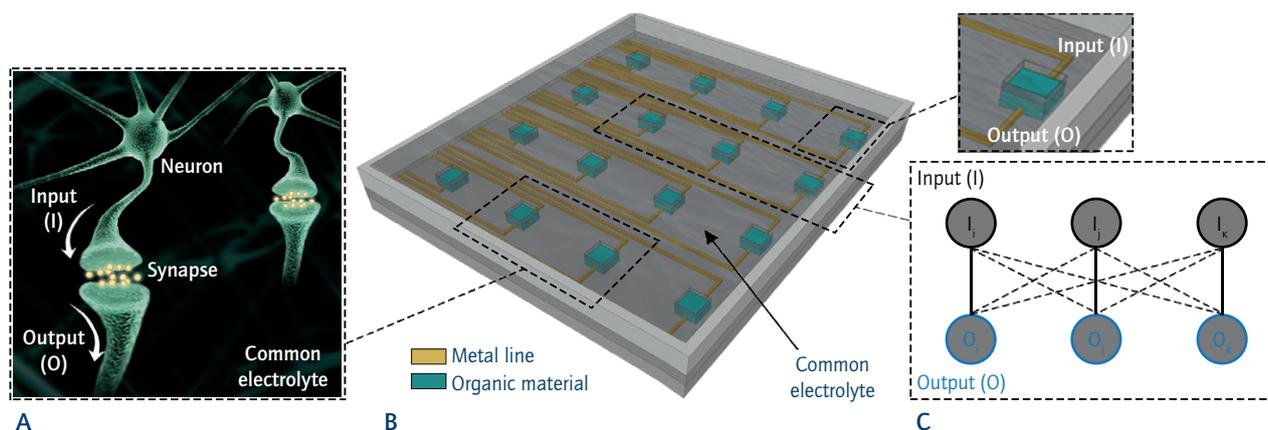


Abbildung 40: (A) Neuronen und Synapsen in einem biologischen neuronalen Netzwerk. Die Funktion/Struktur eines biologischen neuronalen Netzwerks ist ein ideales Beispiel für die Implementierung von neuromorphen Schaltkreisen der Zukunft. (B) Vereinfachte Darstellung einer Anordnung von organischen elektrochemischen Transistoren auf der Basis von gemischten Leitern mit neuroinspirierten Merkmalen bei der Verarbeitung, die in einen gemeinsamen Elektrolyten eingetaucht sind. (C) Konnektivitätsmedien für neuroinspirierte Architekturen: Komplexe Verbindungen werden durch den Elektrolyten (gestrichelte Linien) hergestellt, wenn eine Reihe von organischen elektrochemischen Vorrichtungen in einen gemeinsamen Elektrolyten getaucht wird (Quelle: Gkoupidenis et al. 2017 [CC BY 4.0]).



9.4 Interview Henk Jonkers, Firma Green Basilisk¹⁴⁹

Prof. Dr. Henk Jonkers leitet als außerordentlicher Professor die Nachhaltigkeitsgruppe im Bereich „Materials & Environment“ an der „Civil Engineering and Geosciences“-Fakultät der Technischen Universität Delft. Seine Forschung befasst sich mit der Entwicklung innovativer, biobasierter und nachhaltiger Baumaterialien, und er ist wissenschaftlicher Berater des Spin-off-Unternehmens Green Basilisk.

Prof. Jonkers, welche Bedeutung hat die Biologisierung der Materialwissenschaften und ihr Innovationspotenzial für Ihr Land?

Wir gehen davon aus, dass biologisch inspirierte und biobasierte Forschung zu Prozessen oder Produkten führt, die effizienter sind als herkömmliche. Das Thema hat also eine große Bedeutung und ein großes Potenzial, wirtschaftlich, aber auch gesellschaftlich. Als Land und Region haben wir mit der vom niederländischen Wirtschaftsministerium finanzierten Selbstheilungsforschung begonnen. Das Ministerium geht davon aus, dass unsere Ideen zur Entwicklung neuer Technologien und Produkte führen können, die gesellschaftlich relevant und auch für den Export geeignet sind.

Passiert das schon?

Wir haben unser eigenes Start-up namens Green Basilisk, das selbstheilenden Beton vermarktet, der langsam seinen Weg in internationale Anwendungen findet. Das Interessante ist, dass wir einen Unterschied zwischen Europa und Asien in der Mentalität sehen. In Asien ist man für Innovationen viel aufgeschlossener, und wir haben untersucht, warum dies so ist. Wir haben drei verschiedene Produkte entwickelt: einen selbstheilenden Beton für Neubauten und zwei Reparaturprodukte für beschädigte Konstruktionen. In Europa besteht ein großes Interesse an den Reparaturprodukten, in Asien eher am Beton.

Warum ist das so?

Wir glauben, das liegt an den vielen Regelungen und Normen der europäischen Baubranche. Dadurch müssen alle Beteiligten sicherstellen, dass nicht ihre Firma schuld ist, wenn es ein



Abbildung 41: Henk Jonkers mit einem Würfel aus bioinspiriertem, selbstheilendem Zement (Quelle: Green Basilisk)

Problem gibt. Alles ist außerdem standardisiert, was Innovationen vollständig blockiert. Innovation bedeutet etwas Neues, was mit Risiken verbunden ist, aber europäische Investoren sind konservativ und führen Risikoanalysen durch. In Asien machen sie dagegen „Chancenanalysen“ und bewerten den potenziellen Nutzen. Wenn Sie von Anfang an die „Life-Cycle-Kosten“ betrachten, können Sie viel Geld und Ressourcen sparen. Unser Produkt ist eine Lösung für ein Problem, das der Markt manchmal noch gar nicht sieht. Im Jahr 2050 will unsere niederländische Regierung zu mehr als 95 Prozent eine Circular Economy.

Wie kann eine Circular Economy erreicht werden?

Unternehmen müssen profitabel sein und arbeiten nicht „zirkulär“, wenn es teuer ist. Obwohl es viele Innovationen gibt, werden sie von den Märkten nicht aufgegriffen, weil sie teuer sind. Aber es gibt eine einfache Lösung: Die Politik muss sich neue Regelungen einfallen lassen, um die Unternehmen anzutreiben. Zum Beispiel könnte sie die Verwendung von Primärressourcen bepreisen. Dadurch würde ein Wettbewerb auf dem Markt ausgelöst, um die Verwendung von Primärressourcen zu reduzieren oder Abfallprodukte wiederzuverwenden. Wenn das nicht passiert, sind innovative Unternehmen benachteiligt, und es wird nichts passieren.

149 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.

Können Sie mir erklären, wie Ihr selbstheilender Beton funktioniert?

Der bioinspirierte Teil ist natürlich die Selbstheilung. In der Biologie gibt es Organismen, die Beschädigungen bis zu einem gewissen Limit verkraften, weil sie sich wie unser menschlicher Körper selbst reparieren können. Es war unser Ziel, Materialien und Mechanismen zu entwickeln, die in traditionelle Materialien integriert werden können, mit dem Potenzial, sich selbst zu heilen. Bei herkömmlichem Beton bilden sich unter Spannung Mikrorisse, und Wasser kann eindringen, was letztendlich die Lebensdauer verkürzt. Dies wird traditionell durch eine Überdimensionierung des Materialeinsatzes gelöst, was nicht nachhaltig ist. Aus diesem Grund haben wir einen selbstheilenden Beton auf der Basis von Bakterien entwickelt, die beim Einmischen in den Beton überleben. Sie werden durch das in die Mikrorisse einströmende Wasser aktiviert, das ja normalerweise gerade das Problem darstellt, aber in unserem Fall die Lösung

ist. Die aktivierten Bakterien wandeln ebenfalls eingemischte Nährstoffe in Kalkstein – ein betonähnliches Material – um und dichten so die Risse ab. Das ist Biomimikry von seiner besten Seite: Einerseits lernen wir von der Natur, wie ein Organismus mit Beschädigungen fertigwird und sich selbst repariert, und andererseits ist der Ansatz biobasiert, da wir natürliche Bakterien verwenden. Zudem werden so Geld und Ressourcen gespart, und genau das ist es, worauf es in Asien ankommt. In Europa ist man in der Baubranche begeistert von den Reparaturprodukten, wenn der Schaden schon da ist.

Es stehen in Asien also schon Konstruktionen, die mit Ihrem Produkt gebaut wurden?

Einer unserer Kunden ist ein japanischer Bauunternehmer, der derzeit die meisten seiner Konstruktionen mit selbstheilendem Beton baut und solche Gebäude bereits verkauft. In den Niederlanden sind wir bisher erst auf der Demonstrator-Ebene.



10 Interdisziplinäre Aspekte: Geisteswissenschaften und Gestaltungsdisziplinen

Prof. Dr. Peter Fratzl

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

Die Aktivität von Systemen beruht auf dem Zusammenspiel von Energie, Information und Materie. Das traditionelle Bild dazu könnte ein Industrieroboter sein, der aus Stahl und Aluminium gebaut ist (Materie), durch ein Computerprogramm gesteuert wird (Information) und elektrisch angetrieben wird (Energie). Die Trennung zwischen diesen drei Bedingungen für Aktivität lässt sich allerdings weder aus physikalischer noch aus technischer und auch nicht aus historisch-kulturwissenschaftlicher Sicht aufrechterhalten.

Schon in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zeigte der Physiker Ludwig Boltzmann, dass (Un)Ordnung mit Wahrscheinlichkeiten und daher Information zusammenhängt. Die daraus resultierende Entropie ist ein wesentlicher Bestandteil der freien Energie eines Systems. Die Einstein'sche spezielle

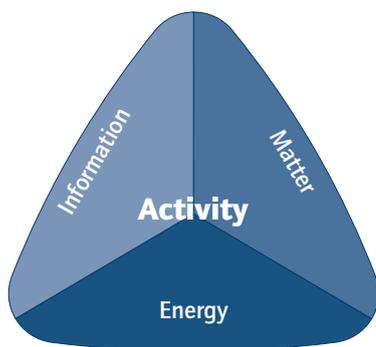


Abbildung 42: Aktivität als Verbindung von Materie, Energie und Information (Quelle: Wolfgang Schäffner, Institut für Kulturwissenschaft, Humboldt-Universität zu Berlin, und Peter Fratzl, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung MPIKG)

Relativitätstheorie hingegen stellt eine Äquivalenz von Materie und Energie her, indem Masse in Energie umgewandelt werden kann und umgekehrt. Daraus muss folgen, dass auch Materie und Information enger verknüpft sind als allgemein angenommen: Sobald Materie nicht in einem vollständig amorphen Zustand vorliegt, speichert sie Information als Struktur auf verschiedensten Größenskalen von atomaren Dimensionen bis zur äußeren Form. Die meisten technisch nutzbaren Materialeigenschaften beruhen auf Strukturen, die kontrolliert in das Material eingebracht werden und daher die „Information“ für das Verhalten der Materialien darstellen. Das trifft genauso auf die Kontrolle der mechanischen Eigenschaften von Metalllegierungen durch Versetzungen und Ausscheidungen zu wie auf die Farben von Schmetterlingsflügeln, die auf periodische Porenanordnungen zurückgehen. Aufgrund der Wachstumsprozesse sind natürliche Materialien auf vielen Größenskalen strukturiert, was ihnen auch einen hohen Informationsgehalt verleiht.^{150, 151} Die Einheit von Materie, Information und Energie ist daher ein wesentliches Konzept, das aus der Biologisierung der Materialwissenschaft folgt.

Im Folgenden analysiert zunächst Wolfgang Schäffner die Relation zwischen Materie und Information aus kulturwissenschaftlicher Perspektive (siehe Kapitel 10.1). Die Literaturwissenschaftlerin Karin Krauthausen und der Philosoph Michael Friedman (siehe Kapitel 10.2) diskutieren den Begriff aktive Materie. Markus Buehler vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) stellt das Prinzip der „Materiomik“ vor, bei welchem Organismen ganzheitlich als Vorbilder für die Materialentwicklung betrachtet werden (siehe Kapitel 10.3). Die Architektin und Designerin Christiane Sauer zeigt Beispiele für das Design mit Faserstrukturen – ein zutiefst bioinspirierter Ansatz, da nahezu alle biologischen Gewebe aus Fasern aufgebaut sind (siehe Kapitel 10.4).

Die interdisziplinäre Schnittstelle zwischen Biologie und Ingenieurwissenschaften stellt nicht nur eine Herausforderung für Lehre und Unterricht dar, sondern bietet auch besondere Chancen. Die Biologin Olga Speck berichtet hierzu über ihre Erfahrungen (siehe Kapitel 10.5). Schließlich diskutieren der Chemiker Cordt Zollfrank und einige Kolleginnen und Kollegen den Zusammenhang mit der Bioökonomie (siehe Kapitel 10.6).

Im Interview mit Vertretern der Firma BASF werden einige der Herausforderungen deutlich (siehe Kapitel 10.7). Einerseits sind klassische Strukturmaterialien schon sehr weit entwickelt und

150 | Vgl. Fratzl/Weinkamer 2007.

151 | Vgl. Estrin et al. 2019.

von hoher Qualität; bioinspirierte Lösungen werden es hier schwer haben. Gute Chancen bestehen hingegen für komplexere Materialien mit hoher integrierter Funktionalität, wie zum Beispiel Lebensmittelfolien, die die Haltbarkeit von Lebensmitteln erhöhen oder überprüfen. Insgesamt kommt es mehr auf das „Mindset“ als auf direktes Übertragen von Lösungen an. In der Zusammenarbeit mit Kunden im Design-Zentrum der BASF werden konzeptuelle Lösungen erarbeitet; einige davon können von biologisch inspirierten Konzepten profitieren.

Bei den bioinspirierten Materialwissenschaften ist eine Förderung von stark interdisziplinären Forschungsansätzen unter Einbeziehung von Geisteswissenschaften und Designdisziplinen wesentlich. Dadurch entsteht das Potenzial, einen Paradigmenwechsel im Einsatz von Materialien herbeizuführen und die industrielle Entwicklung langfristig zu beeinflussen.

10.1 Materie und Information

Prof. Dr. Wolfgang Schöffner
Institut für Kulturwissenschaft, Humboldt-Universität zu Berlin

Der Beitrag der Geisteswissenschaften im Rahmen der Biologisierung der Materialwissenschaften besteht darin, aus einer wissenschafts- und kulturtheoretischen Perspektive deutlich zu machen, dass es dabei um weit mehr als nur eine neue Form der Optimierung existierender Technologien geht. Denn es handelt sich hier um einen fundamentalen Wandel unserer gesamten Technologie, die vor allem seit dem 19. Jahrhundert dadurch charakterisiert ist, dass ihre materiale Basis als passive und nur ausführende Struktur von außen kodiert, aktiviert und gesteuert wird. Die Passivität und Trägheit, die dabei der Materie zugeschrieben wurde, hatte wichtige Konsequenzen bei der Materialwahl: Ein möglichst neutrales Material als „Hardware“ für Maschinen soll deren störungsfreies Funktionieren ermöglichen. Dies gilt für klassische mechanische wie auch digitale Techniken. Die damit verbundene Trennung von Materie und Information realisiert technisch das, was man aus der Geschichte der Philosophie als Trennung von Geist und Materie kennt¹⁵² – eine Trennung, die nicht zuletzt im 19. Jahrhundert die Gründung der Geisteswissenschaften in ihrer dezidierten Abkehr von der Technologie motivierte.

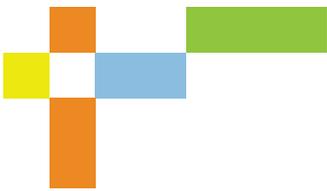
Die Wende, die sich gegenwärtig mit Blick auf biologische Materialien abzeichnet, stellt ein fundamentales Ereignis dar,

das als post-digitale, materiale Revolution ein neues Verhältnis von Materie und Information möglich macht. Deshalb stellt diese Situation auch eine grundlegende Herausforderung für die Geisteswissenschaften dar: Es bedarf einer epistemologischen und historischen Analyse, um in den gegenwärtigen Materialwissenschaften die Möglichkeit einer dezidierten Abwendung von diesem Prinzip der passiven Materie sichtbar machen zu können. Denn die biologischen Materialien erweisen sich als selbst aktiv und basieren damit nicht mehr auf dieser Trennung von passiver Materie und externer Aktivierung und Steuerung. Wenn die innere Struktur der Materialien eine intrinsische Aktivität kodiert, dann ist Materie selbst zu einem System geworden, das Energie und Information integriert.

Diese eigene Aktivität war in der Geschichte nicht unbekannt: Bis weit über die Antike hinaus wurde diese materiale Aktivität in Europa in Praktiken und Techniken verwendet – andere Kulturen haben dieses Verständnis von aktiven und intelligenten Materialien sogar bis heute erhalten. Im Rahmen der modernen Technik jedoch wurde diese Aktivität nicht als Energiedepot und Kodierung einer eigenen Art erkannt, sondern als Störung auszuschalten versucht. So ist die Aktivität von Holz zwar seit Langem bekannt, doch war dies der Grund sie durch Formen wie Sperrholz zu neutralisieren, oder eben Holz als Material durch andere „passivere“ Baustoffe zu ersetzen.

Somit erscheint es als zentrale Aufgabe, diese innere Aktivität und Kodierung von Materie zu untersuchen: Im Gegensatz zu unseren digitalen Codes können die aktiven Materialien als Hardware eines analogen, geometrischen Codes oder – anders ausgedrückt – als eine operative Geometrie verstanden werden, in der Materielles und Immaterielles, „Geist“, Information und Materie, miteinander verschmelzen. Damit wäre ein Code zu beschreiben und zu entwickeln, der nicht nur symbolisch Prozesse repräsentiert und simuliert, sondern sie zugleich auch material ausführt. So könnte diese Wende zu Materie und aktiven Materialien auch die kybernetische Trennung von materialer Mechanik und steuernden informatischen Prozessen, die auch die Grundlage der digitalen Technik ist, aufheben. Wenn nämlich die aktiven biologischen Materialien Materie und Information, Symbolisches und Materiales intrinsisch miteinander verbinden, stellen sie integrierte maschinelle Systeme dar, die als technisches Prinzip eine fundamentale Herausforderung darstellen.

Für die Geisteswissenschaften heißt das, nicht nur sich selbst neu in ihrem Verhältnis zu einer neuen Kultur des Materialien zu



bestimmen. Auch eine neuartige „Geistes- und Materialwissenschaft“^{153, 154} als interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geistes- und Naturwissenschaften, Ingenieurwesen und Gestaltung ist notwendig, um die Trennung von Materie und Geist/Information institutionell überwinden zu können. Diese Zusammenarbeit ist das zentrale Anliegen des Exzellenz-Clusters „Matters of Activity“ an der Humboldt-Universität zu Berlin.¹⁵⁵

10.2 Aktive Materie

Dr. Michael Friedman und Dr. Karin Krauthausen
Exzellenzcluster ‚Matters of Activity. Image Space Material‘,
Humboldt-Universität zu Berlin

Wie kann man dieses neue Konzept von Materie und Materialität verstehen, das unter dem Namen „Active Matter“ bekannt geworden ist? Und um welche Operationen geht es, wenn wir über die Aktivität von Materialien sprechen? Man kann sich diesen Fragen annähern, indem man die dreidimensionale Struktur von Materialien betrachtet, denn jede Art von Material hat eine solche Struktur, egal ob es sich um tote oder lebendige Materie handelt. Auf dieser dreidimensionalen Struktur beruht auch eine grundlegende Operation von Materialien: das Falten, das einen Formwandel ermöglicht und dabei oft eine Funktionsänderung mit sich bringt. Ein einfaches Beispiel hierfür ist das Öffnen und Schließen einer oder zwei Ebenen entlang einer eindimensionalen Achse, wie das beim Kiefernzapfen der Fall ist: Bei trockenem Wetter heben sich die Schuppen, und der Zapfen öffnet sich, bei Regen oder Feuchtigkeit senken sich die Schuppen, der Zapfen schließt sich wieder. Die Schuppen können sich also bewegen, und die Form des Zapfens verändert sich, wobei die sich ausfaltende und wieder einfaltende dynamische Struktur den Formwandel bewirkt. Diese Aktivität scheint kontraintuitiv, wenn man bedenkt, dass der Kiefernzapfen weitgehend aus toter Materie besteht.¹⁵⁶ Doch gibt es weitere Beispiele für die Faltungsaktivität organischer Systeme, so etwa die Entfaltung

der pentagonal geformten Samenkapseln bei der Prächtigen Fetthenne, die ebenfalls einen ausgeklügelten Mechanismus des Sich-selbst-Aussäens ermöglichen. Diesen Mechanismus der Samenkapseln erklärt eine Studie von Lorenzo Guiducci und Khashayar Razghandi: „[T]heir fruit undergoes a reversible origami-like unfolding upon sufficient hydration [...]. The engine of the investigated movement was found to be the water adsorption and swelling of the cellulosic inner layer of the cell wall of the hygroscopic keel cells. The complex large-scale movement, however, could only be explained in terms of the sophisticated hierarchical design of the entire capsule.“¹⁵⁷ Die Entfaltung ist daher ein Beispiel für „actuation systems [...] [which] do not depend on the active role of living cells [...]“.¹⁵⁸

Schon die beiden Beispiele Kiefernzapfen und Samenkapseln der Fetthenne zeigen, dass solche dreidimensionalen materialen Strukturen einen Vorteil haben (verglichen mit statischen Strukturen), da sie einen Mechanismus ermöglichen, der eine Emergenz des lebenswichtigen Strukturwandels im materialen Raum bewirkt. Dies ist auch den Studien zum Wachstum von Blättern zu entnehmen: „[P]lant surface development, according to which the form of some biological surfaces is not genetically programmed in detail, but results from a coarse genetic control of growth rates, complemented by ‚emergent processes‘ induced by geometric constraints of space and elasticity.“^{159, 160} All die genannten Beispiele weisen darauf hin, dass die sogenannte tote Materie nicht tot (im Sinne von absoluter Passivität) ist oder zumindest nicht als solche betrachtet werden sollte. Materie kann in sich selbst operativ sein – dieses Verständnis eröffnet neue Horizonte, um die Aktivität von Materialien in all ihren verschiedenen Aspekten zu berücksichtigen, und zwar ohne das Moment der Aktivität auf lebende Organismen einzuschränken. Dabei sollte der Fokus auch nicht per se auf der sich (aus- oder ein-)„faltenden“ oder „gefalteten“ Struktur liegen, sondern grundsätzlicher auf der Aktivität der Struktur. Diese Aktivität der Materialien hängt an dem jeweiligen Strukturtypus und kann beispielsweise ebenso auf Weben, Flechten oder Verstrickung beruhen.^{161, 162} Aufschlussreich ist hier eine Formulierung von Wolfgang

153 | Vgl. Schöffner 2016b.

154 | Vgl. Schöffner 2015.

155 | Vgl. Humboldt-Universität zu Berlin 2019.

156 | Vgl. Friedman/Krauthausen 2017.

157 | Siehe Guiducci/Razghandi et al. 2016, S. 1 f.

158 | Siehe Guiducci/Razghandi et al. 2016, S. 2.

159 | Siehe Prusinkiewicz/Barbier de Reuille 2010, S. 2121.

160 | Vgl. Guiducci et al. 2016.

161 | Gewebte Strukturen zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein eindimensionales Ausgangsmaterial in zwei- und dreidimensionale Objekte mit höherer Stabilität (und zugleich mit Flexibilität) verwandeln. Die Forschung versucht, diese gewebten Topologien zu verstehen und sie auf die Molekularebene zu übertragen, indem sie selbstorganisierende Fäden einsetzt. Mögliche Anwendungen wären die Katalysis, Gastrennung und Speicherung.

162 | Vgl. Lewandowska et al. 2017.

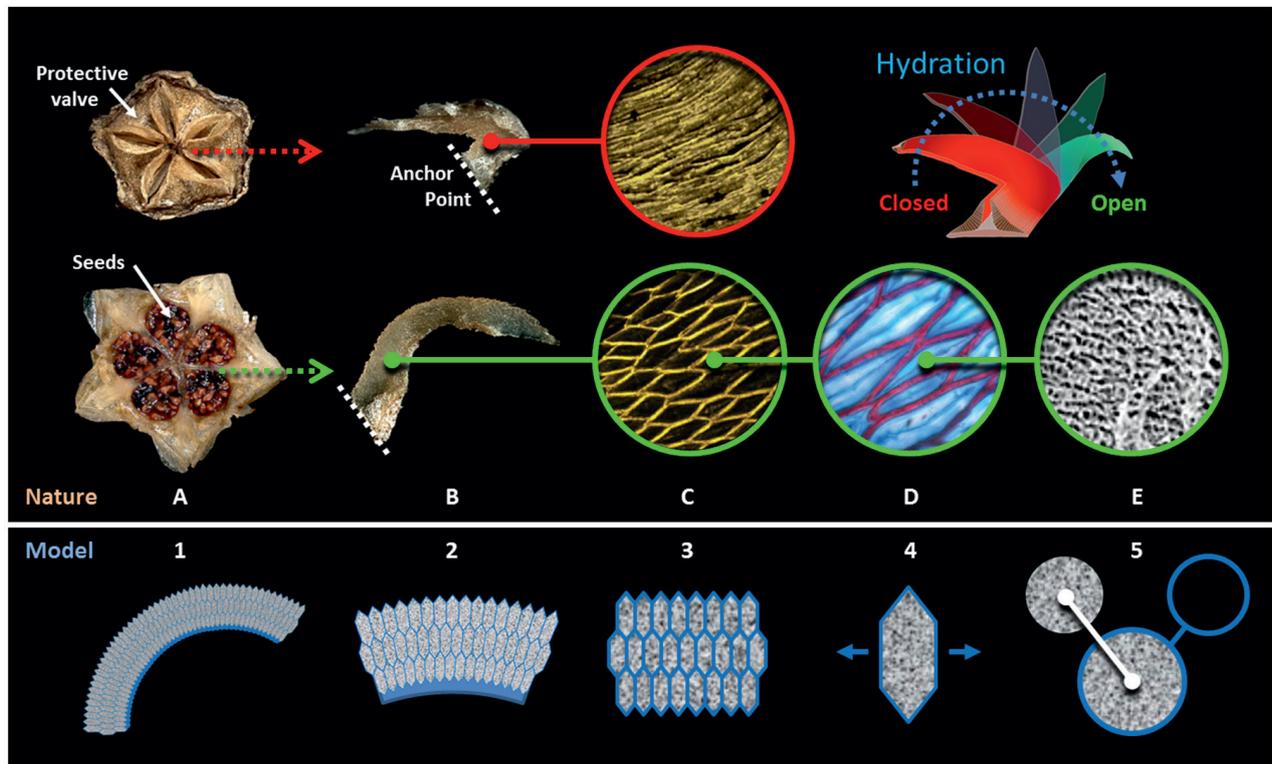


Abbildung 43: Oben: Die zugrunde liegende Architektur (auf unterschiedlichen Längenskalen) ermöglicht die reversible Entfaltung der Samenkapseln der Prächtigen Fetthenne. Unten: Abstraktion der Aktivierungsprinzipien auf unterschiedlicher Längenskala. Das Loslösen vom biologischen System unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Prinzipien in einfachen Modellen ermöglicht die Gestaltung von bioinspirierten aktiven Materialsystemen. Von rechts nach links: Das Quellen eines stark quellbaren Materials innerhalb einer geschlossenen Zelle führt zu einer gleichmäßigen Volumenänderung der Zelle. Durch Anpassen der Geometrie der Zelle kann eine Richtungsverformung erzielt werden; beispielsweise kann eine längliche hexagonale Form zu einem Anschwellen in Richtung der langen Zelleite führen. Durch das Anordnen solcher Zellen in einer Zellstruktur kann die Verformung vergrößert werden; beispielsweise würde sich die Wabenstruktur beim Anschwellen ausdehnen. Der resultierende Aktuator kann justiert werden, um unterschiedliche Verformungsmodi zu erreichen; begrenzt man zum Beispiel eine Seite einer solchen Wabenstruktur, dann hat dies eine Biegung der gesamten Struktur zur Folge (Quelle: Guiducci/Razghandi et al. 2016 [CC BY 4.0]).

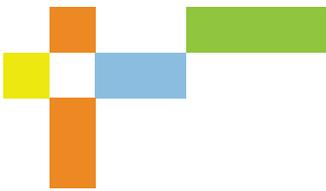
Schäffner, der natürliche Materialien als Technologie (genauer: als „Techniken anderen Typs“) begreift und daraus folgert: „Natur ist also nicht der Technik entgegengesetzt, sondern erscheint als Depot von technischen Lösungen.“^{163, 164} Die Technik besteht in den oben genannten Beispielen in der materialen Operation des Faltns, die als ein aktiver Prozess und Ursache für die immanente Emergenz eines Strukturwandels zu verstehen ist. Es geht dann in der Gegenwart nicht allein darum, die Auffassung der passiven Materie zu überwinden,¹⁶⁵ sondern das Konzept der aktiven

Materie zudem mit der neuartigen Produktion von neuen – zum Beispiel „gedruckten“ – Materialien zu verbinden, um auch hier die allzu bequeme Vorstellung von der Passivität des Materials zu unterminieren. Die gefalteten oder vielmehr die sich faltenden Materialien haben hierfür Modellcharakter, da sie die Emergenz zukünftiger Strukturen in sich tragen, wie Matthew R. Gardiner schreibt: Der Vorteil der neuen „processes of Fold Mapping and Fold Printing, [...] [that of printing] cohesive geometry and fabrication methods, is that previously impossible objects and

163 | Siehe Schäffner 2016a, S. 29.

164 | Vgl. Fratzl 2016.

165 | Vgl. Schäffner 2016a.



concepts are now possible to design and fabricate".¹⁶⁶ Die Materialstrukturen provozieren im Verbund mit neuesten Technologien (wie dem 3D-Druck) neuartige Problemstellungen und Komplexitäten – für die sie selbst die Lösungen anbieten. Diese Lösung besteht in einer materialen Programmierung, die der dreidimensionalen Struktur der Materialien folgt und diese dabei nicht als passiv begreift, sondern sich von der ihnen eigenen Aktivität inspirieren lässt.¹⁶⁷

10.3 Bioinspirierte Materiomik¹⁶⁸

Prof. Dr. Markus J. Buehler
Massachusetts Institute of Technology MIT, Boston,
United States of America

Die Natur bietet einige der fantastischsten Materialien und Prozesse, mit denen solche Materialien hergestellt werden. Prominente Beispiele sind Seide, Knochen oder Muscheln.^{169, 170, 171, 172} Im Grenzgebiet der Materiomik ist die Übertragung von Erkenntnissen aus einem Bereich in einen anderen von besonderem Interesse: Beim Design neuer Materialien werden so Mechanismen kombiniert, die in verschiedenen natürlichen Materialien zu finden sind. Ein solches Beispiel könnte die Kombination von bestimmten Proteinen sein: Werden die Eigenschaften der Seidenproteine, die für ihre hohe Festigkeit und Zähigkeit bekannt sind, mit denen von Elastinproteinen kombiniert, die wiederum für ihre Elastizität und Einstellbarkeit bekannt sind, könnte eine neue Proteinsequenz entwickelt werden. Im „neuen“ Protein würden die Eigenschaften von Seide und Elastin dann gemischt vorliegen. Obwohl diese Proteine in der Natur nicht zusammen vorkommen – sie sind in unterschiedlichen Organismen und an unterschiedlichen Orten zu finden –, ist es durch bioinspirierte Verfahrenstechnik möglich, solche Materialien zu De-novo-Proteinen mit neuartigen Eigenschaften zu kombinieren.¹⁷³

Bei der von der Natur inspirierten Werkstofftechnik ist die Art und Weise, wie Materialien entwickelt, hergestellt und im Zuge ihrer Verwendung aktiv kontrolliert werden, besonders spannend. Zum Beispiel kann bei einem komplexen, aus Spinnenseide gefertigten Netz¹⁷⁴ die Spinne als intelligente Signalverarbeitungseinheit beziehungsweise als neuronales Netzwerk betrachtet werden: Sie erfasst die Schwingungssignale des Netzes und entscheidet basierend auf diesen externen Vorgaben, wie das Netz zu bauen und entwickeln ist. Eine Spinne überwacht unentwegt ihr Netz und entscheidet, wo und wie dessen Struktur verstärkt oder repariert werden soll. Dabei fungiert sie als eine Art autonomer 3D-Drucker, der bei Bedarf verschiedene Arten von Materialien hinzufügt. Diese Sichtweise der auf neuronalen Netzen basierenden Materialherstellung eröffnet Materialwissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern neue Forschungswege, natürliche neuronale Netzwerke (das Insekt) durch Künstliche Intelligenz oder künstliche neuronale Netzwerke zu ersetzen.^{175, 176, 177} Bei diesem Ansatz kopiert das bioinspirierte Design nicht lediglich die in der Natur vorkommenden Geometrien, sondern ahmt auch den Herstellungsprozess dieser Biomaterialien nach und imitiert, wie sich diese im lebenden System und in der entsprechenden Umgebung entwickeln. Dies kann zu autonomen Systemen führen, in denen Herstellungs- und Reparaturmechanismen bereits in das Material eingebaut sind.

Dieser erweiterte Ansatz der bioinspirierten Materiomik konzentriert sich auf die Überwindung der Manifestationen von Materie und untersucht eingehender die Gestaltungsprinzipien, wie bestimmte Eigenschaften unterschiedlicher Funktionssysteme von lebenden Organismen erzeugt werden. Dies wird nicht nur im Zusammenhang mit Materialien, sondern auch mit Ausdrucksformen der Sprache, Kunst und mit anderen Manifestationen, die lebende Systeme an den Tag legen, untersucht. Beispielsweise können sowohl biologische Materialien als auch menschliche Ausdrucksformen der Kunst als hierarchische Systeme verstanden werden, die durch eine konstruierte

166 | Siehe Gardiner 2018, S. 187.

167 | Für einen Überblick über die Ansätze und Themen der Forschung zu aktiven Materialien beziehungsweise aktiven materialen Strukturen vgl. Fratzl et al. 2020.

168 | Dieser Beitrag wurde vom Englischen ins Deutsche übersetzt.

169 | Vgl. Fratzl/Weinkamer 2007.

170 | Vgl. Barthelat et al. 2016.

171 | Vgl. Buehler 2013.

172 | Vgl. Cranford/Buehler 2012.

173 | Vgl. Yeo et al. 2018.

174 | Vgl. Su et al. 2018.

175 | Vgl. Silver et al. 2016.

176 | Vgl. Schmidhuber 2015.

177 | Vgl. He et al. 2016.

Anordnung von Bausteinen über Längen- und Zeitskalen hinweg Komplexität und Funktion aufbauen (siehe Abbildung 44A). In einer aktuellen Arbeit haben wir am Massachusetts Institute of Technology beispielsweise die Schnittstelle von Material und Klang untersucht. Wir konnten zeigen, wie wir Skalen in Raum und Zeit überschreiten können, um das Unsichtbare für unsere Sinne zugänglich zu machen und Materie von verschiedenen Blickwinkeln aus zu manipulieren. Das funktioniert, indem wir innovative Mittel wie beispielsweise die Wechselwirkung von Künstlicher Intelligenz (KI) mit menschlicher Kreativität anwenden.^{178, 179, 180}

Die online hinterlegte Audiodatei¹⁸¹ zeigt die Transformation von westlicher klassischer Musik als Beispiel eines hierarchischen Systems hin zu Musik, die aus einem Zusammenspiel hierarchischer Klänge entsteht; diese Klänge wurden durch die Schwingungen von Proteinmolekülen erzeugt. Eine Folge unserer Arbeit könnten das Design und die Herstellung neuer Materialien, neuer Kunst und Musik sowie die Entwicklung eines tiefen mathematischen Verständnisses von den Funktionsgrundlagen unterschiedlicher Erscheinungsformen hierarchischer Systeme sein. Dafür können Designkonzepte aus einem Bereich bei der Manifestation eines anderen angewendet werden (siehe Abbildung 44B).

Als konkretes Beispiel für diesen Paradigmenwechsel hin zu Designmaterialien können die Strukturen von Proteinen, die durch deren Aminosäuresequenzen vorgegeben sind, in Klang übersetzt werden. Im Audioraum können diese Strukturen nun durch das Komponieren neuer Musik verändert werden. Bei der Rücktransformation werden diese neuen Töne wieder in neue Proteine umgewandelt (siehe Abbildung 44C). Es können auch bereits vorhandene Musikkompositionen verwendet werden, aus denen die hierarchischen Muster extrahiert werden, die dann direkt im Materialdesign verwendet werden können. Dieser Ansatz, ein hierarchisches Systemdesign über verschiedene Erscheinungsformen von Materie hinaus (in Material, Klang, Worten etc.) zu nutzen, eröffnet einen ungewöhnlichen Weg, neue Materialien zu entwerfen. Er erweitert auch unsere Fähigkeit, Materie in einem Bereich zu manipulieren, in dem strukturelle Variationen auftreten (zum Beispiel Mutationen in Aminosäure-Sequenzen). Diese können wiederum durch den Einsatz verschiedener Sinne (zum Beispiel des auditorischen Systems)

und mithilfe alternativer theoretischer Modelle (zum Beispiel der Musiktheorie) besser verstanden werden, indem ein plattformübergreifender Ansatz – biologische Materialien unter Verwendung der Materiomik zu untersuchen – zum Einsatz kommt.

Die Erkenntnisse aus diesem Ansatz tragen zu anwendungsrelevanten Themen bei, etwa zur Erklärung der Stärke von Seide oder der Entstehung von Krankheiten, zur Gestaltung neuer Kunst und zur Erforschung der zugrunde liegenden Philosophie dessen, was Material und Vorstellungskraft ausmacht. Die Übersetzung von verschiedenen hierarchischen Systemen ineinander wirft ein neues Paradigma auf, um die Entstehung von Eigenschaften in Materialien, Sprache, visueller Kunst, Musik und ähnlichen Systemen zu verstehen, und führt zu einer Reihe neuer Forschungsrichtungen in der Materiomik. Datenbasierte Methoden, ergänzt durch mathematische Ansätze wie die Kategorientheorie, stellen die Art von Werkzeugen dar, die es uns jetzt ermöglichen, diese Felder auf einheitliche Weise voranzutreiben.

Online Audiodatei¹⁸¹ zu hierarchischen Klangsystemen¹⁸²: Beispiel für den Übergang von klassischer westlicher Musik zu Musik, die durch die Schwingungen von Proteinmolekülen entstanden ist (siehe Abbildung 44A). Die zu Beginn gehörte klassische Musik setzt sich aus einer Hierarchie von Klängen zusammen, die von einer Vielzahl klassischer Instrumente (Violine, Bratsche, Cello etc.) hervorgebracht wird. Die proteinbasierte Musik, die in der zweiten Hälfte des Stücks zu hören ist, basiert auf den Klangformen von drei Proteinen: 1) 5iom Protein: Nucleosiddiphosphatkinase von *Schistosoma mansoni* (ein wasserbasierter Parasit, der im Menschen vorkommt und zur Gruppe der Blutegel gehört), 2) 1sve Protein: Proteinkinase A aus *Oryctolagus cuniculus*, *Bos Taurus*. Das Enzym katalysiert den Transfer einer Phosphatgruppe von Adenosintriphosphat (ATP) zu einem bestimmten Molekül (ATP ist eine komplexe organische Chemikalie, die Energie liefert, um viele Prozesse in lebenden Zellen anzutreiben), 3) 4rga-Protein: Phagen-1358-Rezeptorbindungsprotein (seltene Gruppe von Phagen, die *Lactococcus lactis* infizieren).

178 | Vgl. Qin/Buehler 2019.

179 | Vgl. Yu et al. 2019.

180 | Vgl. Hesse 1943.

181 | Markus J. Buehler: <https://soundcloud.com/user-275864738/a1-1>.

182 | Vgl. Qin/Buehler 2019.

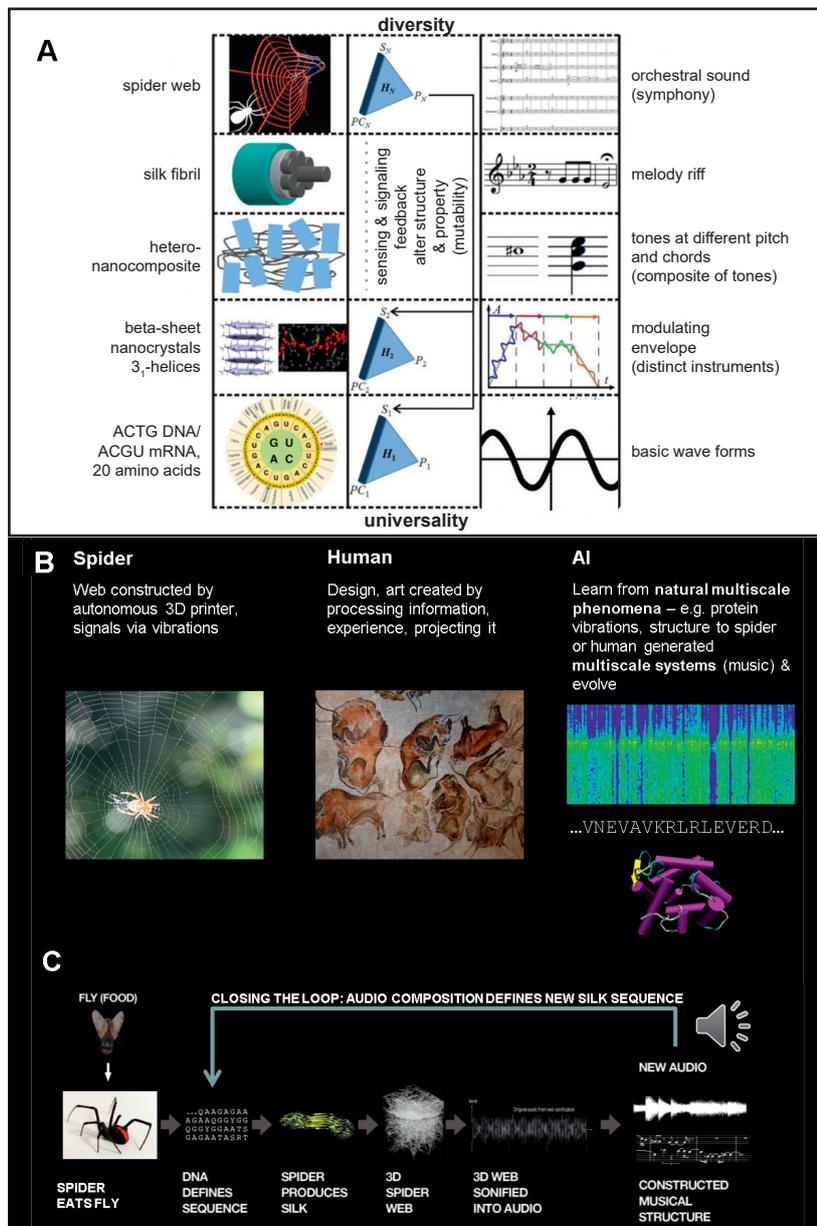


Abbildung 44: A: Hierarchische Systeme in Material und Klang (Audiobeispiel online¹⁸³). B: Neuronale Netze, egal ob sie in Insekten oder Menschen vorkommen, sind die Urheber der Gestaltung hierarchischer Systeme wie zum Beispiel von Materialien (Spinnennetzkonstruktion) und Kunst (Malerei, Musik usw.). Das natürliche neuronale Netzwerk kann durch künstliche Modelle ersetzt werden; mit Künstlicher Intelligenz können einerseits verschiedene hierarchische Systeme, einschließlich Klang, entworfen werden; andererseits ist es möglich, diese Systeme wieder in die Materie zu „übersetzen“. Künstliche Intelligenz fungiert dabei als neutraler Vermittler zwischen verschiedenen Erscheinungsformen. Als Beispiel wird ein neues Material gezeigt, das durch die musikalische Darstellung von Proteinen entworfen wurde.¹⁸⁴ C: Das Schließen des Kreislaufs zwischen Audio- und Materialmanifestationen bietet eine neue Möglichkeit zur Interpolation zwischen biologischen Designs von Materialien und solchen, die durch den menschlichen Ausdruck von Kunst entstanden sind. Dies zeigt, dass Materialien zum Beispiel durch Klang verändert werden können.^{185, 186} (Quellen: Markus J. Buehler, Massachusetts Institute of Technology; Einzelfotos: Höhlenmalerei von Thomas Quine [CC BY-SA 2.0], Spinnennetz von Stephen Dickson [CC BY-SA 4.0] und Rotrückenspinne von Laurence Grayson from Suffolk, UK [CC BY 2.0]).

183 | Markus J. Buehler: <https://soundcloud.com/user-275864738/a1-1>.
184 | Vgl. Yu et al. 2019.

185 | Vgl. Qin/Buehler 2019.
186 | Vgl. Dubus/Bresin 2013.

10.4 Design mit Faserstrukturen

Prof. Christiane Sauer

weißensee kunsthochschule berlin

Betrachtet man Entwurfsprozesse in Design oder Architektur, so steht zu Beginn die gestalterische Ideen- beziehungsweise Konzeptfindung, die – ausgehend von einer konkreten Aufgabenstellung – Form und Funktion in Beziehung zueinander setzt. Oft wird erst im Anschluss an den Entwurf ein geeignetes Materialkonzept gesucht und appliziert.

Die Gestaltung mit Faserstrukturen kehrt dieses Prinzip in einen Bottom-up-Ansatz um. Die Faser beziehungsweise ihre weiterbearbeitete Form als Roving, Garn oder Strang beinhaltet Form, Funktion und Materialität in einem und wird so zum Initial des Entwurfs. Die Art der weiteren Flächenbildung (zum Beispiel als Gelege, Gestrick, Gewebe oder Vliesstruktur) generiert zusammen mit den Eigenschaften der Ausgangsfaser (zum Beispiel Stein-, Glas-, tierische oder pflanzliche Faser) aus sich heraus eine spezifische Funktionalität, die auf den Einsatzzweck abgestimmt werden kann. Das Material wird somit zum zentralen Gegenstand von Gestaltung.

Dieser Paradigmenwechsel im Umgang mit Materialität eröffnet völlig neue Möglichkeiten: Die Eigenschaften einer Fläche oder eines Objekts werden „designed“. Es können gradierte Strukturen mit Materialübergängen – etwa zwischen elastisch und stabil oder zwischen transparent und opak – konzipiert und unterschiedliche Funktionalitäten mit dem gleichen Ausgangsmaterial hergestellt werden.

„Stone Web“ basiert auf dem Naturmaterial Basalt, das in großen Mengen in der Erdkruste vorkommt. In einem industriellen Prozess wird das Lavagestein durch Aufschmelzen zu Filamenten gezogen und zu Rovings oder Garn verarbeitet, das in einer Umkehrung des ursprünglichen Materialcharakters von Stein nun für die Herstellung filigraner und leichter Faserkonstruktionen genutzt werden kann. Sehr gute mechanische und thermische Eigenschaften machen das textile Gesteinsmaterial für viele Anwendungen attraktiv. Dennoch konnte es sich auf breiter Basis noch nicht am Markt durchsetzen und ist unter Designerinnen und Designern so gut wie unbekannt.

Das Modulsystem „Stone Web“ besteht aus abgestumpften Oktaederformen aus gewickelten und harzverstärkten Basaltgarnen (siehe Abbildung 45 und Abbildung 46). Als

Wabensystem, das sich an biologischen Vorbildern orientiert, können die Module zusammengefügt und immer wieder neu konfiguriert werden. Je nach gewünschter Funktion – zum Beispiel Sichtschutz oder Sitzelement – lassen sich Elemente von unterschiedlicher Transparenz, Tragfähigkeit oder Elastizität kombinieren. Die variierende Dichte und Geometrie der Wicklung erlauben es, auch unterschiedliche Bereiche eines Moduls, wie stabile Kanten und elastische Sitzflächen, mit ein und demselben Garn herzustellen – ähnlich dem Aufbau biologischer Materialien, die spezifische Eigenschaften aus der Faseranordnung ihrer Struktur generieren. Das System kann so mit



Abbildung 45: „Stone Web“, ein modulares Leichtbausystem aus gewickelter Basaltfaser, weißensee kunsthochschule berlin, Natascha Unger, Idalene Rapp, Bereich Design und Experimentelle Materialforschung, Prof. Christiane Sauer (Quelle: Natascha Unger, Idalene Rapp, weißensee kunsthochschule berlin)



Abbildung 46: Sitzelemente aus „Stone Web“ (Quelle: Natascha Unger, Idalene Rapp, weißensee kunsthochschule berlin)



geringem Materialeinsatz eine große Bandbreite an Formen und Funktionen ausbilden. Es entsteht ein multifunktional anpassbares System, das unterschiedliche Funktionalitäten erfüllt.

Das große Interesse an solchen faserbasierten Gestaltungsansätzen spiegelt sich in der fachlichen Resonanz wider, die das im Rahmen einer Masterarbeit an der weißensee kunst-hochschule berlin entwickelte System erfahren hat. Unter anderem wurde es auf der Innovationsausstellung „Disruptive Materials – Changing the Future“ im Rahmen der Messe Interzum Köln 2019, auf der Sonderschau Exempla – „Textil-Stoff der Zukunft“ im Rahmen der Internationalen Handwerksmesse München 2019 sowie im Textilmuseum St. Gallen „Neue Stoffe, New Stuff“ 2017 präsentiert. Das System erhielt zudem den ersten Preis in der Kategorie Materialinnovationen beim Studierendenwettbewerb „Textile Strukturen für neues Bauen“ auf der Messe techtextil Frankfurt/Main im Jahr 2017.

Herkömmliche Faserkompositmaterialien basieren auf einer kunststoffbasierten Matrix mit eingebetteten Verstärkungsfasern. Mit „Stone Web“ wurde versucht, das Matrix-Faser-Verhältnis umzudrehen und die Umweltverträglichkeit einer solchen Verbundstruktur zu verbessern. Da die Geometrie der Fasern einen großen Teil der Stabilität übernimmt, konnte der Anteil der Kunststoffmatrix äußerst geringgehalten werden, die Fasern wurden vor der Bearbeitung nur in Harz getränkt. Obwohl das Ausgangsmaterial Basalt zu hundert Prozent Natur ist und somit problemlos entsorgt werden könnte, entsteht durch das versteifende Harz ein Kompositmaterial, das entsprechende Fragen bezüglich Entsorgung und Recycling aufwirft. Eine zentrale zukünftige Herausforderung von Faser-Matrix-Kompositmaterialien wird in der Verbesserung von Verfahren zur Recyclingfähigkeit solcher Werkstoffverbunde und in der Entwicklung von technisch hochwertigen und zugleich umweltverträglichen, pflanzenbasierten Harzen liegen.

10.5 Bildung an der Schnittstelle zwischen Biologie und Materialwissenschaften

Dr. Olga Speck

Plant Biomechanics Group der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Kompetenznetz Biomimetik

Bionische Materialsysteme: Wir leben heute in einer von Natur- und Ingenieurwissenschaften geprägten Welt, in der interdisziplinäres Denken und Arbeiten integraler Bestandteil des lebenslangen Lernens ist.¹⁸⁷ In den letzten Jahren hat sich die Schnittstelle zwischen Biologie und Materialwissenschaften als regelrechte Fundgrube für die Entwicklung bionischer Materialien und Materialsysteme sowie für einen vertieften Erkenntnisgewinn der biologischen Vorbilder herauskristallisiert.¹⁸⁸

Bionisches Arbeiten: Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich Bionik¹⁸⁹ setzen einerseits solides Wissen in den Natur- und Ingenieurwissenschaften voraus, nämlich bei der Ausarbeitung der biologischen (zum Beispiel Hypothesenbildung) oder technischen Fragestellung (zum Beispiel Anforderungsprofil), bei der Untersuchung des biologischen Vorbilds (zum Beispiel Experimente zur Erforschung des Form-Struktur-Funktions-Zusammenhangs) und bei der technischen Umsetzung (zum Beispiel Labor, Technikum, Produktion). Andererseits sind fächerübergreifende Transferleistungen sowohl bei der Identifizierung und Übertragung des Wirkprinzips (basierend auf den mathematischen, chemischen und physikalischen Grundgesetzen) als auch beim Abstraktionsschritt (zum Beispiel Funktionsmodelle, Simulationen, Baupläne) notwendig.

Bisherige Erfolge: In den letzten Jahren ist eine Vielzahl von Lehr- und Lernmodulen zur Bionik in Form von klassischen gedruckten Publikationen, elektronischen Medien (zum Beispiel Bionik-Online¹⁹⁰ und Bionik-Vitrine¹⁹¹) oder Baukästen (zum Beispiel BionicsLab,¹⁹² Bionics4Education¹⁹³) in Deutsch und Englisch entstanden, deren durchgängiges didaktisches Element das Drehkreuz zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften ist. Außerschulische Lernorte (zum Beispiel botanische und zoologische Gärten, Science Center) richten ihre Angebote, wie

187 | Vgl. Speck/Speck 2007.

188 | Vgl. VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences 2011.

189 | Vgl. VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences 2012.

190 | Vgl. Plant Biomechanics Group Freiburg 2016b.

191 | Vgl. Plant Biomechanics Group Freiburg 2013.

192 | Vgl. Plant Biomechanics Group Freiburg 2016a.

193 | Vgl. Festo Didactic SE 2019.

Führungen, Lehrpfade und Experimente zur Bionik, an alle Interessierten – vom Kleinkind bis zum Erwachsenen. In den Schulen haben sich neben den naturwissenschaftlichen Basisfächern auch Fächerverbünde mit Bionik-Unterricht etabliert, an den Hochschulen wurden eigenständige Bionik-Studiengänge eingerichtet, und an den Universitäten werden in den Basisfächern wie zum Beispiel Biologie, Chemie, Physik, Mathematik, Architektur und Design interdisziplinäre Abschlussarbeiten und Promotoren zur Bionik angeboten.

Kritische Betrachtung: Obwohl Bionik anschaulich beschrieben werden kann, halten sich einige Missverständnisse hartnäckig. Dazu gehört, dass immer wieder „bionische Experimente“ für Unterricht und Lehre nachgefragt werden, die es im Sinne der Bionik-Definition gar nicht geben kann. Eher sind Experimente gemeint, die das Wirkprinzip beim biologischen Vorbild oder beim bionischen Produkt demonstrieren. Darüber hinaus sind bionische Entwicklungen keine einfachen Analogien, die aufgrund desselben Wirkprinzips als Parallelentwicklungen in Natur und Technik betrachtet werden müssen (zum Beispiel

Saugnapf). Vielmehr bedeutet Bionik die systematische Übertragung der beim biologischen Vorbild gefundenen Wirkprinzipien auf ein bionisches Produkt.¹⁹⁴ Ferner werden aufgrund ihres Ideenflusses von der Biologie in die Technik bionische Produkte im Vergleich zu konventionellen Produkten oft als nachhaltiger eingestuft. Diese pauschale Zuschreibung eines bionischen Versprechens¹⁹⁵ ist nicht haltbar, sondern muss in vergleichenden Nachhaltigkeitsbewertungen überprüft werden, wobei die Auswahl des Vergleichsprodukts von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis ist.¹⁹⁶

Zukunftsvisionen: Daten, Informationen und Wissen sind durch das Internet zu einem öffentlichen Gut geworden. Deren zunehmende Bedeutung stellt in unserer heutigen Wissensgesellschaft neue Ansprüche an Bildung und Weiterbildung von Personen jeden Alters. Gerade an den Schnittstellen verschiedener Disziplinen, wie im Fall der Bionik zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften, sind Fachkompetenz, Kontextwissen und Teamfähigkeit gefragt.

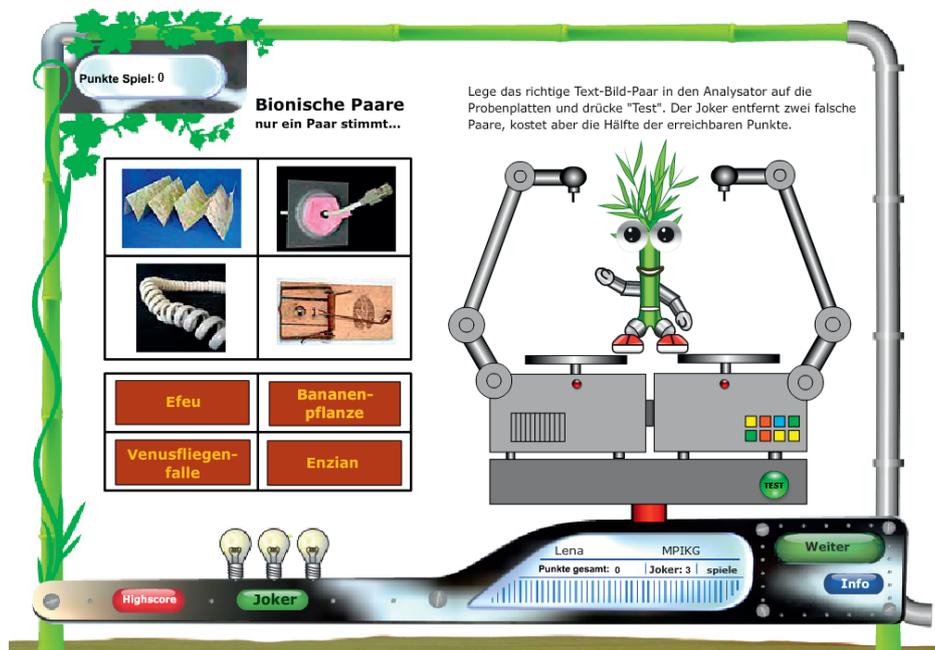


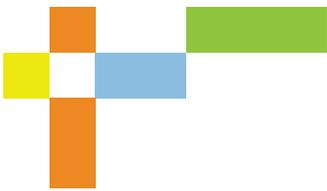
Abbildung 47: Billy Bamboo führt durch das Bionik-Quiz, das in Hochdeutsch, Schwäbisch und Englisch im Internet¹⁹⁷ gespielt werden kann (Quelle: Olga Speck, Universität Freiburg).

194 | Vgl. Speck et al. 2017.

195 | Vgl. von Gleich et al. 2007.

196 | Vgl. Antony et al. 2012.

197 | Vgl. Plant Biomechanics Group Freiburg 2016c.



10.6 Wirtschaftswissenschaften und bioinspirierte Materialforschung

Prof. Dr. Magnus Fröhling, Prof. Dr. Claudia Doblinger, Prof. Dr. Sebastian J. Goerg, Prof. Dr. Cordt Zollfrank
TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit (TUMCS), Technische Universität München

Von der Biologisierung der Material- und Werkstoffwissenschaften und der Etablierung einer Bioökonomie im Allgemeinen werden verschiedene Innovationspotenziale erwartet. Hierzu gehören neue Eigenschaften und Funktionen biologisierter Materialien ebenso wie positive Effekte hinsichtlich Nachhaltigkeitskriterien und Rohstoffwandel. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von Perlmutter aus der Muschelschale als Vorbild für eine nachhaltige Produktion und hochtechnologische Nutzung bioinspirierter Strukturwerkstoffe oder Baumaterialien. Der hierarchische Aufbau von Perlmutter mit Kalziumkarbonat- und Biopolymerphasen (Chitin, Proteine) über mehrere Längenskalen hinweg bedingt dessen außergewöhnliche Eigenschaften, die in technischen Werkstoffen bislang unerreicht sind. Um Aussagen über die Potenziale einer solchen Anwendung zu treffen und diese auszuschöpfen, ist eine enge Verzahnung von technisch-naturwissenschaftlicher mit wirtschaftswissenschaftlicher Forschung sinnvoll. Aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht sind

Grundlagen- und Anwendungsforschung notwendig, um diese bioinspirierten Strukturwerkstoffe zur Verfügung zu stellen und ihre anwendungstechnische Eignung und Vorzüglichkeit zu demonstrieren, etwa als Ersatz gängiger Baustoffe wie Beton.

Mit den Methoden der technoökonomischen Bewertung, eines *Life-Cycle-Assessment (LCA)* sowie eines *Social LCA*, können die direkten Nachhaltigkeitswirkungen eines solchen bioinspirierten Werkstoffs und seiner industriellen Umsetzung bewertet werden. Forschungs- und entwicklungsbegleitend können so Schlüsselgrößen hinsichtlich wirtschaftlicher, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeitskriterien identifiziert und die Material- und Prozessentwicklung unterstützt werden.

Darüber hinaus liefert die Innovationsforschung wichtige Erkenntnisse über die erfolgreiche Adoption und Verbreitung von bioinspirierten Materialien für neue Gebrauchs- und Hochleistungsmaterialien sowie den damit zusammenhängenden Prozessen. Weiter kann die Definition von Geschäftsmodellen zur erfolgreichen Vermarktung der Innovation beitragen. Zusätzlich ist es möglich, zu benennen, welche Nutzergruppen zu welchem Zeitpunkt im Diffusionsverlauf angesprochen werden sollten.

Sehr groß ist der Bedarf an grundlegender wirtschaftswissenschaftlicher Methodenentwicklung, wenn die zu erwartenden sozioökonomischen Wirkungen einer Verbreitung neuer



Abbildung 48: Bioinspirierte Materialien in ihrem soziotechnischen und ökologischen Umfeld (Quelle: Cordt Zollfrank, TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit TUMCS)

Verfahren prospektiv untersucht werden sollen (zum Beispiel bei der Einführung und Nutzung von bioinspirierten Strukturwerkstoffen). Dies gilt für die Ergänzung und Substitution bestehender, aber auch für die Entwicklung und Implementierung neuer Produkte und Wertschöpfungsketten. Hier sind die dynamische Anpassung der Systeme, in die diese Verfahren eingebettet sein werden, sowie die gegenseitigen Wechselwirkungen in Bezug auf die Nachhaltigkeitskriterien zu berücksichtigen (siehe Abbildung 48). Dabei spielen dann auch gesamtwirtschaftliche Faktoren wie Preisschwankungen auf internationalen Märkten oder nationale und internationale Regulierungsbestrebungen (zum Beispiel potenzielle CO₂-Steuer und CO₂-Zertifikate) eine große Rolle, da diese Abwägungen in Produktion und Entwicklung direkt oder indirekt beeinflussen. Eine konsequente Biologisierung – oder besser gesagt: die Ausschöpfung des Potenzials bioinspirierter Materialien – im Rahmen der Transformation hin zu einer Bioökonomie führt neben den Innovationspotenzialen auch zu strukturellen Veränderungen und somit auch zu negativen Konsequenzen für einzelne Stakeholder. Hier gilt es, vorausschauende Maßnahmen zu entwickeln, um Chancen zu verbessern und Risiken abzumildern. Dies würde helfen, eine breitere Akzeptanz der Gesellschaft für bioinspirierte Materialien zu generieren.

Aus diesem Grund können sich technisch-naturwissenschaftliche Forschung auf der einen und wirtschaftswissenschaftliche Forschung auf der anderen Seite durch eine enge Verzahnung in vielfältiger und besonderer Weise wechselseitig in Bezug auf bioinspirierte Materialien ergänzen: Die technisch-naturwissenschaftliche Forschung profitiert von den sozioökonomischen Erkenntnissen, die Wirtschaftswissenschaften von detaillierten Kenntnissen und somit realitätsnäherem Arbeiten. Die bioinspirierte Material- und Werkstoffwissenschaft kann durch die nachhaltige Nutzung biogener Rohstoffe und den Input der Wirtschaftswissenschaften zielgenau und effizient umgesetzt werden.

10.7 Interviews mit Mitarbeitern der Firma BASF SE

10.7.1 Interview Jens Rieger, Firma BASF SE

Dr. Jens Rieger, studierter Physiker, ist – mit mehr als dreißig Jahren Erfahrung in der Materialforschung der BASF – 2019 in den Ruhestand getreten.

Herr Dr. Rieger, was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in den Material- und Werkstoffwissenschaften in den letzten Jahren?

Ein tolles Beispiel ist das Verständnis der „Superoberflächen“, also Oberflächen mit superhydrophoben beziehungsweise superhydrophilen Eigenschaften, da gibt es spannende Anwendungen in verschiedenen Ausprägungen. Ebenso sind Hybridmaterialien, also Materialien aus organischen und anorganischen Komponenten, ein großes Thema, auch wenn Materialforscherinnen und -forscher der BASF jetzt nicht direkt die Muschelschale – eines der bekannten Beispiele für ein Hybridmaterial – nachbauen wollen. Die Natur kann Inspiration geben. In der Forschung wollen wir verstehen, wie die Natur spezielle Eigenschaftsprofile darstellt, und diese Erkenntnisse dann, wenn es sich anbietet, bei der Entwicklung neuer Materialien einbringen. Es gibt bereits konkrete Anwendungsbeispiele in der Architektur und im Bauwesen, zum Beispiel die Minimalflächen-Geometrien des Dachs des Olympiastadions in München. Spannend ist auch das Thema topologisch optimierte Materialien, aber dazu können Ihnen die Designerinnen und Designer der BASF designfabrik® mehr erzählen; sie haben einen Stuhl mit sehr filigranem Design entwickelt, wobei die Idee der Materialeinsparung durch optimale Lastenverteilung durch die Natur inspiriert ist, die in dieser Beziehung ja richtungsweisend ist: mit minimalem Materialaufwand den maximalen Effekt erzielen.

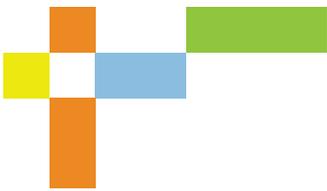
Was sind aus Ihrer Sicht die großen Hürden für die Entwicklung und Umsetzung beziehungsweise die Herausforderungen?

Ich denke, ein gewisses Hemmnis ist, dass wir bereits sehr gute Materialien für viele klassische Anwendungen haben. Wir sollten daher den Blick weiten und darauf schauen, was die großen Themen mit gesellschaftlicher Relevanz sind, wie beispielsweise Nachhaltigkeit und Energiemanagement, und aus dieser Perspektive ableiten, welche Beiträge eine stärkere Biologisierung der Material- und Werkstoffwissenschaften liefern kann.

Ein eher technisches Hemmnis ist der Umstand, dass die Natur Zeit hat, um Materialien und Strukturen zu generieren (zum Beispiel während des Wachstums von Pflanzen), und diese Zeit haben wir in typischen Herstellungsprozessen nicht. Zudem „lebt“ die Natur, das heißt, Strukturen können erneuert werden, wie etwa Haut oder andere Oberflächen – ein Phänomen, das sich so nicht einfach nachahmen lässt.

Was würden Sie sich wünschen, um da voranzukommen?

Die Aktivitäten der Forschung und Entwicklung bei BASF kommen gut voran. Aber wir können noch einen Schritt weitergehen und das Thema noch stärker in der Öffentlichkeit



platzieren. Das Thema Biomimetik beziehungsweise Biologisierung von Materialien kann Türen öffnen, das ist eine komfortable Startposition.

10.7.2 Interview Andreas Mägerlein und Alex Horisberger, BASF designfabrik®

Andreas Mägerlein ist Ingenieur, Industriedesigner und Leiter der BASF designfabrik®, und Alex Horisberger ist Industriedesigner und Mitarbeiter der BASF designfabrik®.

Herr Horisberger, wie schätzen Sie das Innovationspotenzial von aus der Natur abgeleitetem Wissen ein?

Wir nutzen seit vielen Jahren Wissen, das aus der Natur abgeleitet ist, zum Beispiel, um bei der Produktentwicklung einen wirtschaftlichen Vorteil zu schaffen, indem man weniger Material verbraucht und Produkte leichter macht.

Herr Mägerlein, wie sehen Sie das?

Allerdings ist der Aufwand im Vorfeld schon groß, bis man an dem Punkt ist. Als klassischer Ingenieur ist man manchmal überrascht, wenn man Simulationsergebnisse sieht, in die biomimetische Überlegungen eingegangen sind. Die Berechnungstools sind verhältnismäßig teuer, das bedeutet, dass kleine, mittelständische Firmen es sich nicht unbedingt leisten können, so zu arbeiten. In der klassischen Ingenieurausbildung spielt Biomimetik noch so gut wie keine Rolle – bestenfalls hat man mal ein Buch darüber gelesen. Allerdings ändert sich das langsam: „Computer-aided Design“ und der 3D-Druck werden immer wichtiger.

Genau, was war denn für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in den letzten Jahren, Herr Horisberger?

Die größte Freiheit für das Design hat sicher der 3D-Druck gebracht. Er brachte aber gleichzeitig auch Schwierigkeiten mit sich: Anfangs waren die Materialien zu schwach, und das Ergebnis konnte nicht seriell hergestellt werden. Aber so langsam verbessern sich die Materialeigenschaften und werden vergleichbar mit denen von Spritzgusskunststoffen. Mit der 3D-Druck-Technologie kann ich auch Wachstumsstrukturen und Hohlkörper abbilden und weit über die Möglichkeiten traditioneller Werkzeuge hinausgehen.

Und was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen in diesem Bereich, Herr Mägerlein?

Das Thema Materialkreislauf ist auch sehr interessant! Wir haben zum Beispiel ein Material entwickelt, das in einem industriellen Komposter bei einer ganz bestimmten Temperatur und Feuchtigkeit abgebaut werden kann. Die Anforderung ist, dass der Abbauprozess erst nach Gebrauch eines Produkts anfängt; das Ende des Gebrauchs muss individuell bestimmt werden können. Am Ende bleibt ein reines Biomaterial zurück, das in den Boden zurückgeführt werden kann.

Ein anderes wichtiges Thema ist die Digitalisierung. Erst jetzt hat man etwa genug Rechenkapazität und die entsprechenden Tools, um biomimetische Strukturen nachbilden zu können – zum Beispiel die Nutzung der Mechanismen von Knochenwachstum im Zeitraffer zur virtuellen Entwicklung komplexer Bauteile. Wachstum ist immer ein Optimierungsprozess, und ein Knochenbruch führt beispielsweise dazu, dass die Bruchstelle steifer und fester wird, weil der Knochen auf die Belastung reagiert. So macht das auch eine Software: Sie optimiert in iterativen Rechenschritten. Das hatte man zwar schon länger verstanden, aber jetzt kann man es endlich auch in wirtschaftlicher Geschwindigkeit rechnen. Die Fertigung solcher Teile, die Verrippungen und Verästelungen an den richtigen Stellen haben, war bisher auch nicht möglich. Mit dem 3D-Druck kann ich nun das, was ich am Computer entwerfe, auch fertigen. Der nächste Schritt in der Zukunft wird meiner Meinung nach sein, dass ein Bauteil mithilfe von Simulationen und 3D-Druck aus sich selbst herauswächst, das wird irgendwann kommen. Natürlich wird es dauern, bis so etwas in Serie gehen kann. Aber auch beim 3D-Druck hat man vor zehn Jahren noch gedacht, der Markt sei zu klein dafür, und jetzt wird viel Aufwand betrieben, da mitzumachen.

Alles in allem glaube ich, dass es in der Zukunft keine Entwicklung geben wird, die ohne den biomimetischen Gedanken ablaufen wird, schon deshalb, weil wir einen Weg finden müssen, mit unseren Ressourcen zu wirtschaften und zu optimieren. Und die Natur hat schon seit Millionen Jahren optimiert – unter anderem den Materialeinsatz. Es ist auch Biomimetik, wie man Material wieder einem Kreislauf zuführt und Wiederverwertbares und neue Produkte generiert. Da sind wir leider längst noch nicht so weit wie unser Vorbild. Es ist noch nicht einmal sicher, dass es dazu einen Konsens gibt, aber langsam entwickelt sich eine Lobby für das Thema.

Das Innovationspotenzial von aus der Natur abgeleitetem Wissen schätze ich also als essenziell ein, und wichtig ist, dass man darüber hinausgeht. Zum Beispiel hat die Natur natürlich keinen Stuhl hervorgebracht, aber man kann Prinzipien der Natur nutzen und auf unsere menschlichen Produkte anwenden, zum Beispiel beim Design eines Stuhls. Wir haben das Design eines Stuhls basierend auf klassischen organischen Prinzipien mit unserer Expertise und Simulationskompetenz unterstützt. Wir haben uns vom Baumwachstum abgeschaut, wie man den Materialeinsatz optimieren und trotzdem den spezifischen Belastungen Rechnung tragen kann – das ist ein klassisches biomimetisches Prinzip unter Berücksichtigung einer von den Designern vorgegebenen Gestaltung.

Herr Mägerlein, was sind denn aus Ihrer Sicht die großen Hürden oder Herausforderungen für die Entwicklung und Umsetzung in diesem biomimetischen Bereich?

Sowohl die Machbarkeit als auch die Wirtschaftlichkeit, denn eine der wichtigsten Materialeigenschaften soll ja bekanntlich der Preis sein. Aber ich bin optimistisch, das öffentliche Interesse am Ressourceneinsatz ist da. Es ist zwar immer schwierig, neue Ideen auf den Markt zu bringen, aber vielleicht sollte man bionische Strukturen als Marketing-Prinzip nutzen und das an die große Glocke hängen. Die Firma Festo macht das ganz gut, und Soft-Robotik und Künstliche Intelligenz sind natürlich sowieso große Zukunftsthemen.

Was würden Sie sich denn wünschen, damit es in dem Bereich vorangehen kann, Herr Horisberger?

Regulatorien sind immer ein wunderbarer Motivator. Wenn bioabbaubare Tüten vom Gesetzgeber vorgeschrieben werden, dann haben wir auch kein Problem mehr, preislich mit konventionellen Materialien konkurrieren zu müssen. Aber ich glaube auch daran, dass das Material durch dessen Eigenschaften überzeugen sollte und nicht durch den Preis. Das ist auch bei einigen neuen Materialien der Fall.

Und wie sehen Sie das, Herr Mägerlein?

Der Fokus sollte auch auf Interdisziplinarität liegen, das fängt doch im Studium bereits an. Schon da muss vermittelt werden, dass man als Ingenieur auch mal mit einem Biologen sprechen kann, wenn es um Materialentwicklung geht. Auch ein Designer sollte ruhig mal eine Veranstaltung von einem Ingenieur

besuchen. Das ist das Konzept unserer designfabrik®, wir haben ein extrem breites und interdisziplinäres Netzwerk. Andererseits wird der Lehrinhalt auch immer komplexer, sodass eine stetige weiterführende Spezialisierung notwendig ist. Da ist es fast ein Widerspruch und ein Dilemma, dass eine interdisziplinäre Aufstellung gefordert ist. Am Ende sollen sich idealerweise verschiedenste Fachleute direkt miteinander unterhalten. Wir als designfabrik® stellen einen Tisch zur Verfügung, an den wir die richtigen Leute setzen wollen. Wir sind nur so schlau wie die Leute, die gerade im Raum sitzen. Dafür ist natürlich ein Grundverständnis des Problems wichtig, und man muss die richtigen Leute kennen, die man dann an einen Tisch bringen möchte.

10.7.3 Interview Andreas Wüst, BASF SE

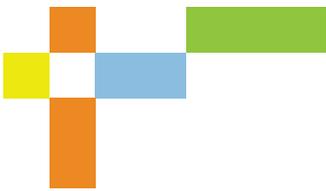
Andreas Wüst ist Head of Dynamic Structural Analysis bei der BASF SE.

Herr Wüst, was ist Ihre Aufgabe bei der BASF?

Ich unterstütze unsere Kunden, die Materialien bei uns kaufen, bei der richtigen Auslegung der Bauteile. Zu berücksichtigen sind dabei die Materialeigenschaften, aber auch der Herstellungsprozess und das angestrebte Design. In diesem Zusammenhang bin ich schon in den neunziger Jahren auf numerische Verfahren gekommen, die auf bionischen Prinzipien beruhen. Für mich ist die Bionik nicht nur das Abkupfern aus der Natur und etwas ähnlich Aussehendes zu bauen, sondern das Verständnis, wie etwas eigentlich funktioniert. Ob das am Ende Außenstehende an die Biologie erinnert, ist vollkommen irrelevant.

Wie kann ich mir das vorstellen? Haben Sie ein gutes Beispiel, was dabei für ein Produkt herauskommt?

Wir haben zum Beispiel zusammen mit der Firma Opel eine untere Stoßfängerabstützung mithilfe dieser bionisch inspirierten Methoden entwickelt. Die biologisch inspirierte Topologieoptimierung ist in der Industrie angekommen. Bei uns gibt es kein strukturell belastetes Bauteil mehr, bei dem diese Methoden nicht zum Einsatz kommen. Wir entwickeln die Methoden noch weiter, und dabei helfen die Entwicklungen im 3D-Druck: Da kann man das Verfahren wesentlich flexibler anwenden. Die Schwierigkeit bei der Topologieoptimierung ist, dass sich das optimierte Design der Natur nicht einfach mit einer



Spritzgussmaschine umsetzen lässt. Beispielsweise kommen in der Natur Hohlstrukturen vor, die mit traditionellen Fertigungsverfahren nur mit großem Aufwand herzustellen sind. Daher muss man immer Kompromisse machen und das Ergebnis nach einer bionischen Untersuchung erst mal interpretieren und übertragbar machen. Die Weiterentwicklung der Topologieoptimierung ist das „Generative Design“, das die Ergebnisse glättet und verbessert und gleich in eine 3D-Druckanweisung umwandelt.

War dann der 3D-Druck für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen der letzten Jahre in diesem Bereich, oder gab es da andere wichtige Entwicklungen?

Nicht der 3D-Druck, sondern der Erkenntnisgewinn aus der Natur: zum Beispiel das Verständnis, dass es einen intrinsischen Kraftfluss in einem Bauteil gibt. Den können wir nur dadurch rauskriegen, indem wir von der Natur abschauen, wie sie das machen würde. Man macht sich also die Evolution zunutze. Die Übertragung dieses Verständnisses, dass es übergeordnete Gesetzmäßigkeiten gibt, das ist für mich der Kernpunkt an dieser Biologisierung, wenn Sie es so nennen wollen.

Was hat denn den Durchbruch im Verständnis ermöglicht?

Einerseits muss das Wissen und Verständnis auch bei den Ingenieuren ankommen. Die ersten brauchbaren Arbeiten zur Topologieoptimierung gab es Ende der achtziger Jahre, da habe ich studiert, aber das kam in der Lehre noch gar nicht vor. Es hat 15, 20 Jahre gedauert, und der Einzug in die Lehre ist auch jetzt noch nicht abgeschlossen. Zum anderen hat das Wachstum von Computerressourcen geholfen, heute können Studierende 2D-Topologieoptimierung per App auf dem Handy rechnen. Ich habe immer ein Problem mit dem Begriff „Simulation“, das scheint im Gegensatz zur Konstruktion zu stehen. Was wir machen, ist „Virtual Engineering“!

Was würden Sie sich denn wünschen, damit es weiter vorangeht?

Mir fällt immer auf, dass es gute Ingenieurinnen und Ingenieure und gute Biologinnen und Biologen gibt, aber dass der Handschake, eine gewisse Konnektivität dazwischen, fehlt. Man kann damit schon in der Schule anfangen. Ich halte an der pädagogischen Hochschule in Heidelberg Vorträge über die Bionik für angehende Biologielehrerinnen und -lehrer – diese künftigen Lehrkräfte machen dort ein Bionikseminar. Was ich mir schon in der Schule und an der Uni gewünscht hätte – und ich übertreibe jetzt mal: dass die Biologielehrer oder der Biologielehrer etwas erklärt, dann verlässt er den Raum, und auf der anderen Seite kommt die Physiklehrer oder der Physiklehrer rein und macht weiter. Eine systemische Betrachtung ist einfach unzureichend. Wenn jemand eine Fragestellung hat und nach einer Lösung sucht, sucht er natürlich nur im eigenen Metier danach, wo er sich auskennt. Wenn er nicht weiß, dass überhaupt solche Verfahren existieren, wird er nicht danach suchen. Interdisziplinäre Bildung würde ich mir wünschen und dass dementsprechend auch Lehrstühle besetzt werden.

Eine andere Möglichkeit, bionische Methoden zu platzieren, besteht durch Co-Creation, also durch gemeinsame Bauteilentwicklungen mit Firmen, die bisher noch nicht mit solchen Methoden gearbeitet haben. Wir erweitern derzeit bei der BASF in Ludwigshafen unser Creation Center, indem wir gezielt zusammen mit Kunden neue Methoden innovativ einsetzen. Hiermit steigern wir die Akzeptanz, wenn die Biologie letztlich einen positiven Beitrag zum wirtschaftlichen Erfolg eines Produkts leistet.

In der langfristigen Perspektive geht es um Ressourcenschonung: Wenn ich ein Bauteil herstelle, das doppelt so lange hält, habe ich ein Bauteil gespart. Dazu braucht es allerdings einen Paradigmenwechsel und ein anderes Optimierungsziel. Momentan geht es darum, die Herstellungskosten zu minimieren. Stattdessen sollten Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit, also gewissermaßen die „Gesellschaftskosten“, miteinbezogen werden.

11 Bibliometrie, Förderprogramme, Verbände

Dieses Kapitel fasst einige Daten zu bisherigen Publikationen und Patenten auf dem Gebiet der biologisierten Materialforschung zusammen. Exemplarisch werden auch einige bestehende oder abgeschlossene Förderprogramme sowie Stellungnahmen von Verbänden präsentiert.

Die Analyse der Publikationen wurde so durchgeführt, dass nicht nur die Anzahl der Publikationen selbst, sondern auch die Anzahl von deren Zitierungen in den Grafiken einbezogen wurden. Dadurch wird nicht nur die Anzahl, sondern auch der Impact dieser Publikationen in der wissenschaftlichen Gemeinschaft berücksichtigt. Bemerkenswert ist der starke Anstieg der

Publikationen etwa seit Mitte der neunziger Jahre (siehe Abbildung 49). Beim Impact der Veröffentlichungen liegen die USA vor China weit vorn, gefolgt von den drei großen europäischen Ländern Deutschland, England und Frankreich (siehe Abbildung 50).

Auch die auf diesem Gebiet eingereichten Patente zeigen einen sehr starken Anstieg, etwa mit einer Dekade Verzögerung im Vergleich zu den Publikationen, ab Mitte der Nullerjahre (siehe Abbildung 51). Bemerkenswert ist hier, dass China deutlich vor den USA und Europa liegt (siehe Abbildung 52). Das könnte auf einen Trend hindeuten, der auch in einigen Firmeninterviews angesprochen wird, dass es in Asien eine stärkere Bereitschaft gibt, bioinspirierte Technologien umzusetzen, als in westlichen Ländern.

11.1 Literaturrecherche

Die Recherche wurde mittels Web of Science¹⁹⁸ durchgeführt.

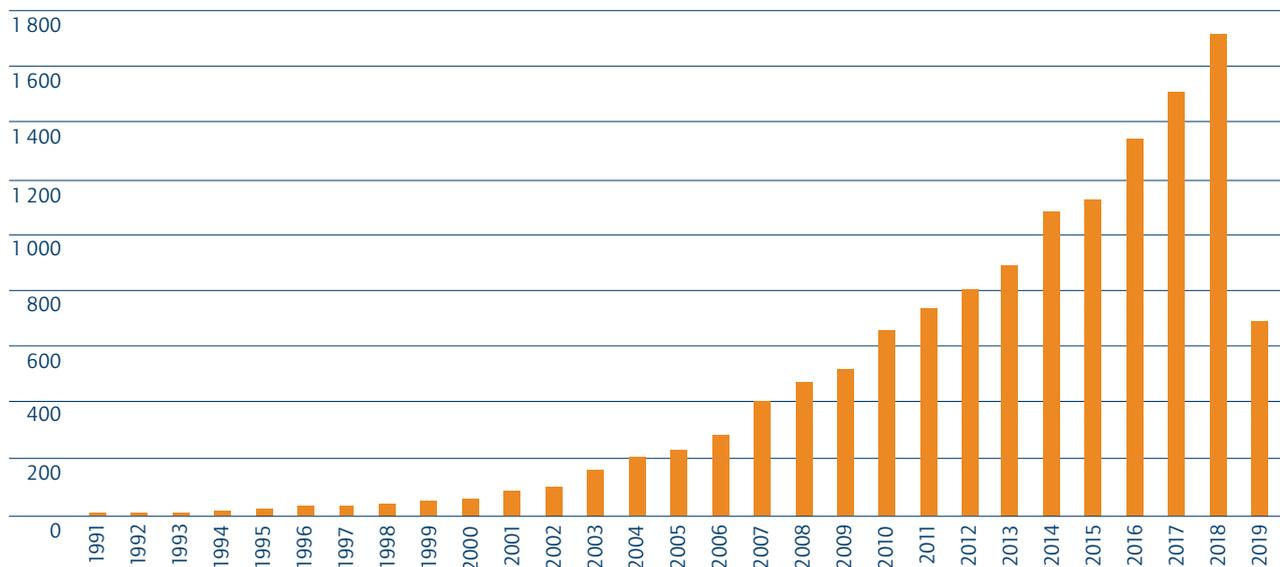


Abbildung 49: Gesamtanzahl der Veröffentlichungen pro Jahr im Zeitraum von 1991 bis 2019. Die Schlüsselwörter der Suche waren TOPIC = („bio-inspired“ OR bioinspired OR biomimetic OR „nature-inspired“ OR biomimicry) AND (material* OR biomaterial*) (Quelle: eigene Darstellung gemäß Clarivate Analytics 2019, Stand: 29. Mai 2019).

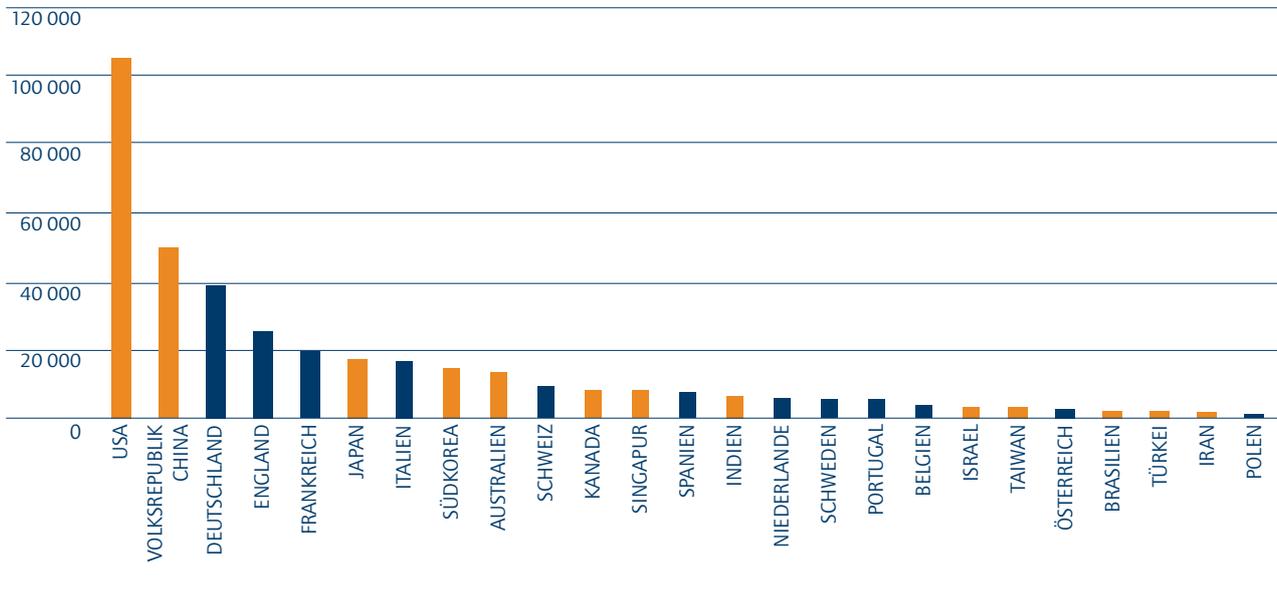


Abbildung 50: Gesamtzahl der Zitationen von Veröffentlichungen aus den genannten Ländern, wobei europäische Länder dunkelblau dargestellt sind. Die Schlüsselwörter der Suche waren TOPIC = ((bio-inspired OR bioinspired OR biomimetic OR nature-inspired OR biomimicry) AND (material* OR biomaterial*)) (Quelle: eigene Darstellung gemäß Clarivate Analytics 2019, Stand 16. April 2019).

11.2 Patentrecherche

Die Recherche wurde mittels DEPATISnet (Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamts für Onlinerecherchen zu Patentveröffentlichungen aus aller Welt) durchgeführt – mit analogen Schlüsselwörtern zur Literaturrecherche.

Die Suche ergab insgesamt 877 Eintragungen (nach Korrektur für Patentfamilien mit insgesamt 2.900 Patenteintragungen).

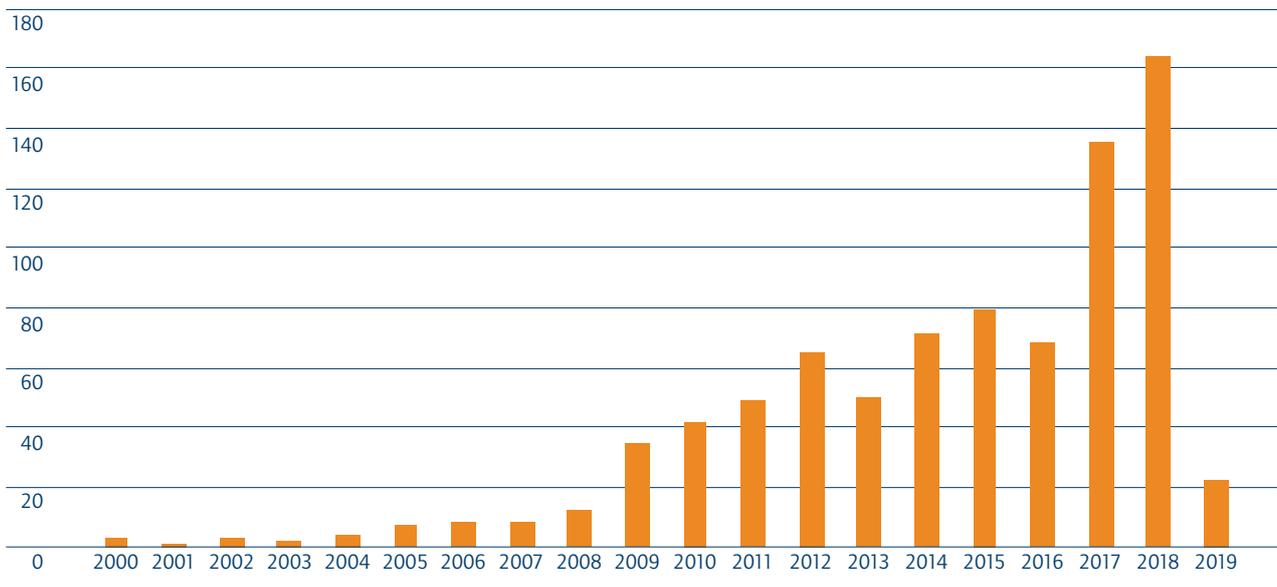


Abbildung 51: Zahl der eingereichten Patente pro Jahr – korrigiert für Patentfamilien. Die Schlüsselwörter der Suche waren: AB = ((bio#mim? OR bioni? OR bio#inspir? OR nature#inspir#) AND (material? OR bio#material?)) (Quelle: eigene Darstellung gemäß DEPATISnet, dem elektronischen Dokumentenarchiv des Deutschen Patent- und Markenamts, Stand 5. Juni 2019).

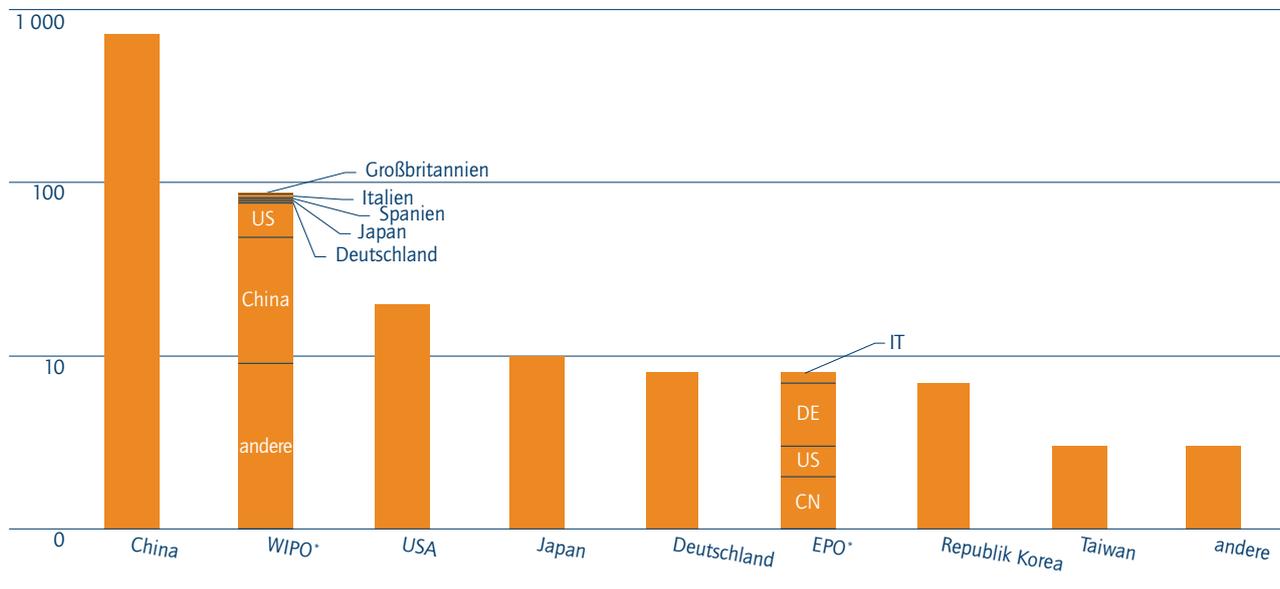


Abbildung 52: Anzahl von durch nationale und internationale Patentämter weltweit akzeptierten Patenten in logarithmischer Darstellung nach Korrektur für Patentfamilien. Die Schlüsselwörter der Suche waren analog zu jenen für die Literaturrecherche: Abstract = ((bio#mim? OR bioni? OR bio#inspir? OR nature#inspir#) AND (material? OR bio#material?)). *WIPO und *EPO repräsentieren die internationalen Agenturen World Intellectual Property Organization und European Patent Office. Hier differenziert die Darstellung zusätzlich nach den Anteilen der häufigsten Herkunftsländer der Antragsteller (Quelle: eigene Darstellung gemäß DEPATISnet, dem elektronischen Dokumentenarchiv des Deutschen Patent- und Markenamts, Stand 5. Juni 2019).

11.3 Ausgewählte DFG-Förderprogramme

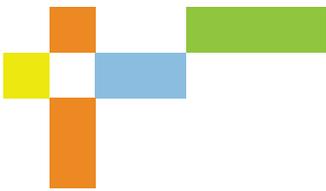
Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) fördert schon seit einigen Jahren bioinspirierte Materialwissenschaft. Hervorzuheben sind insbesondere drei Schwerpunktprogramme, deren Projektbeschreibungen aus dem „Geförderte Projekte Informationssystem“ der DFG im Folgenden aufgeführt werden. Darüber hinaus gibt es drei neu bewilligte Exzellenzcluster sowie einige weitere Schwerpunktprogramme, Sonderforschungsbereiche und Forschergruppen (siehe Tabelle 1).

Erzeugung multifunktionaler anorganischer Materialien durch molekulare Bionik (SPP 1569)

Joachim Bill, Förderung 2012 bis 2019

Anorganische Funktionsmaterialien spielen innerhalb der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts, etwa im Bereich der Informationstechnik oder der Energieerzeugung und -speicherung, eine zentrale Rolle. Dabei sind komplex strukturierte multifunktionelle Materialien auf rein anorganischer Basis sowie im Verbund

mit organischen Anteilen zur Weiterentwicklung dieser Technologien von wesentlicher Bedeutung. Die Erzeugung solcher Materialien mit definierter Struktur und Stöchiometrie über die konventionelle Prozesstechnik, die in der Regel bei erhöhten Temperaturen und/oder Drücken sowie unter erheblichem verfahrenstechnischem Aufwand abläuft, stößt hierbei jedoch an ihre Grenzen. Dementsprechend ist die Suche nach neuen Verfahren, die eine Generierung solcher Materialien bei Umgebungsbedingungen und mit reduziertem prozesstechnischem Aufwand ermöglichen, derzeit Gegenstand weltweiter Forschungsanstrengungen. Für die Bildung von komplex strukturierten anorganischen Festkörpern bei Umgebungsbedingungen liefert die belebte Natur eindrucksvolle Beispiele. So entstehen durch Biomineralisationsprozesse Stoffe wie etwa Calciumphosphat oder -carbonat, deren Bildung genetisch determiniert ist und durch die Wechselwirkung mit Biomolekülen gesteuert wird, wobei unter anderem Selbstorganisationsprozesse eine Rolle spielen. Die hierdurch entstehenden anorganischen Materialien besitzen multifunktionelle Eigenschaften, wobei deren Eigenschaftsspektrum durch den Einbau von bioorganischen Komponenten erweitert wird. Wenngleich viele technisch relevante Materialien bei diesen natürlichen Prozessen keine Rolle spielen, ergeben sich hieraus unmittelbar aussichtsreiche Perspektiven zur Generierung neuer anorganischer Funktionsmaterialien



durch spezifische molekulare Interaktionen zwischen bioorganischen und anorganischen Stoffen. Das Hauptziel dieses Schwerpunktprogramms ist daher die Übertragung von Prinzipien der Biomineralisation auf die Generierung von anorganischen Funktionsmaterialien und von deren Hybriden mit bioorganischen Anteilen. Zur Erreichung dieses Ziels werden Arbeiten durchgeführt (1) zur In-vitro- und In-vivo-Synthese anorganischer Funktionsmaterialien und deren Hybride mit bioorganischen Molekülen in Form von Schichten oder 3D-Strukturen, (2) zur Charakterisierung der Bildungsprozesse und der Struktur der Materialien sowie (3) zur Bestimmung und zum Design von deren physikalischen und chemischen Eigenschaften. Diese experimentellen Untersuchungen werden weiterhin durch Arbeiten zur Modellierung der Materialbildung, -struktur und -eigenschaften begleitet.

Design and Generic Principles of Self-Healing Materials (SPP 1568)

Ulrich Schubert, Förderung 2011 bis 2018

Biologische Materialien haben sich im Laufe der Evolution zu optimierten funktionalen Systemen entwickelt. Eine der herausragenden Eigenschaften von biologischen Materialien ist ihre Fähigkeit zur Selbstheilung und zur Regeneration einer Funktion nach einem durch externe mechanische Belastungen hervorgerufenen Schadensfall. In der Natur kann die Selbstheilung entweder auf der Ebene eines einzelnen Moleküls oder auf der makroskopischen Ebene erfolgen: das Zusammenwachsen von Knochen, das Verschießen und Heilen von verletzten Blutgefäßen und Gewebe. Vom Menschen geschaffene Materialien haben im Allgemeinen nicht diese Fähigkeit zur Heilung, da alle technischen Materialien auf der Basis der 'Schadensvermeidung' und nicht des 'Schadensmanagements' entwickelt wurden und werden.

Selbstheilende Materialien bieten jedoch enorme Möglichkeiten, insbesondere für Anwendungen, bei denen eine Langzeitverlässlichkeit in schlecht zugänglichen Bereichen, zum Beispiel Tunnel, unterirdische Infrastruktur, Hochhäuser oder Weltraumanwendungen, wichtig ist. Weiterhin sind diese Materialien ideal für Anwendungen, die besonders gefährdet für einen Schaden sind, wie zum Beispiel Oberflächenbeschichtungen. Bisher existieren jedoch nur wenige allgemeine Strategien für die zielgerichtete Entwicklung von selbstheilenden Materialien; die bestehenden sind meist nur auf eine Materialklasse und eine bestimmte Anwendungsart fokussiert.

Ein grundlegender Ansatz zur Erforschung von allgemeinen Konzepten, der die Reparaturmechanismen und Strategien für eine allgemeine materialunabhängige Umsetzung adressiert,

fehlt bisher. Daher hat das Schwerpunktprogramm die Konzeption von synthetischen selbstheilenden Materialien und die Aufklärung von allgemeinen materialunabhängigen Prinzipien zum Beispiel die Abfolge von Rissentstehung und -ausbreitung, Mobilität und Transport von Material, Zusammenwachsen von Grenzflächen und die Immobilisierung des transportierten Materials zum Ziel. Unter Berücksichtigung des intrinsischen Charakters von jeder Materialklasse werden allgemeine Ansätze zur Selbstheilung entwickelt, getestet und schließlich in neue Materialien implementiert.

Die Vision des Schwerpunktprogramms ist, dass neue Materialien mit der Fähigkeit zur Selbstheilung den Zugang zu neuen Feldern für Anwendungen im Bereich der biomedizinischen Implantate, von Metallen und Keramiken im Ultraleichtbau sowie im Bereich von Hochleistungspolymeren und Kompositen finden werden.

Biomimetic Materials Research: Functionality by Hierarchical Structuring of Materials (SPP 1420)

Peter Fratzl, Förderung von 2009 bis 2016

Das Ziel des Schwerpunktprogramms ist es, Konzepte für neue Materialien zu entwickeln, die – inspiriert von der Natur – die Möglichkeiten des hierarchischen Aufbaus nutzen und diese mit der Vielfalt an Materialien kombinieren, die uns die Technik zur Verfügung stellt. Damit sollen neue oder ungewöhnliche Kombinationen von Materialeigenschaften und Funktionalitäten erreicht werden. Das wesentliche Konzept besteht darin, dass dieses Ziel durch die Strukturierung eines bestimmten Materials erreicht werden soll, anstatt seine chemische Zusammensetzung zu verändern („Funktion durch Struktur“). Ein zweites Ziel ist es, die komplexen Zusammenhänge zwischen Form, Struktur und Funktion in Organen oder Pflanzenkörpern mit vorwiegend mechanischer Funktion zu erforschen und damit auch das Verständnis von lebenden Systemen zu verbessern.

Der Ansatz beschränkt nicht die Auswahl der Konstituenten, nur das Prinzip des hierarchischen Aufbaus über mehr als zwei Ebenen ist erforderlich. Die zu entwickelnden Materialien werden eine Kombination von Materialeigenschaften aufweisen, die mechanischer, akustischer, elektrischer, optischer oder thermischer Natur sein können. In allen Fällen wird die Eigenschaftskombination durch den hierarchischen Aufbau erreicht. Passive mechanische Eigenschaften (wie Steifigkeit, Festigkeit, Zähigkeit usw.) werden ebenso betrachtet wie aktive Eigenschaften in Zusammenhang mit Aktuation und Motilität.

Mehrere Herausforderungen müssen dabei bewältigt werden: Zunächst ist es erforderlich, einige natürliche Materialien als Beispiel dafür zu studieren, wie die Natur den hierarchischen Aufbau nutzt, um ungewöhnliche Materialeigenschaften zu erreichen. Des Weiteren müssen theoretische und experimentelle Werkzeuge entwickelt werden, um innerhalb der Materialwissenschaft die Problematik des hierarchischen Aufbaus zu bewältigen. Schließlich geht es noch darum, neue Ansätze für die

Synthese und die Verarbeitung von hierarchischen Materialien zu entwickeln. Die Thematik des Programms gliedert sich daher in drei Schwerpunktbereiche: (1) Charakterisierung natürlicher hierarchischer Materialien zur Erstellung eines „Ideenpools“, (2) Erarbeitung von Prinzipien für Design, Simulation und Herstellung von hierarchischen Materialien mit vielversprechenden Eigenschaften, (3) Entwicklung von Herstellungsverfahren für entsprechende Materialsysteme.

	Titel	Sprecherinnen und Sprecher	Förderzeitraum	URL DFG GEPRIS (Geförderte Projekte Informationssystem)
TRR 141	Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien in Biologie und Architektur. Analyse, Simulation und Umsetzung	Jan Knippers	2014 bis 2019	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/231064407
EXC 2025	Matters of Activity. Image Space Material	Wolfgang Schäffner	seit 2019	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/390648296
EXC 2193	Lebende, adaptive und energieautonome Materialsysteme (livMatS)	Anna Fischer, Jürgen Rühle, Thomas Speck	seit 2019	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/390951807
EXC 2068	Physik des Lebens – Die dynamische Organisation lebender Materie	Suzanne Eaton, Stephan Wolfgang Grill	seit 2019	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/390729961
EXC 1027	Bild Wissen Gestaltung. Ein interdisziplinäres Labor	Horst Bredekamp, Wolfgang Schäffner	2012 bis 2018	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/194453117
SPP 1117	Prinzipien der Biomineralisation	Peter Behrens	2001 bis 2007	http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5471129
SPP 1100	Grenzfläche zwischen Werkstoff und Biosystem	Roger Thull	2000 bis 2006	http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5470550
SPP 2100	Soft Material Robotic Systems	Annika Raatz	seit 2019	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/359715917
SFB 599	Zukunftsfähige bioresorbierbare und permanente Implantate aus metallischen und keramischen Werkstoffen	Thomas Lenarz	2003 bis 2014	http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5485789
SFB 1027	Physikalische Modellierung von Nichtgleichgewichtsprozessen in biologischen Systemen	Heiko Rieger	seit 2013	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/200049484
FOR 1405	Dynamik von Elektronentransferprozessen an Übergangsmetallzentren in biologischen und bioanorganischen Systemen	Gerald Henkel, Sonja Herres-Pawlis	2011 bis 2017	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/159419156
FOR 548	Polysialinsäure: Evaluation eines neuen Werkstoffs als Gerüstsubstanz für die Herstellung artifizierender Gewebe	Rita Gerardy-Schahn	2004 bis 2010	https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5471076

Tabelle 1: Ausgewählte Förderprogramme aus dem „Geförderte Projekte Informationssystem“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG (Quelle: DFG)



11.4 Ausgewählte Förderaktivitäten des Bundes

Anders als im Falle der Biotechnologie, in der das Know-how aus diversen technischen Schlüsseltechnologien bereits seit Anfang der neunziger Jahre intensiv zur Wissensgenerierung eingesetzt wird, ist aus förderpolitischer Sicht der Wissenstransfer aus den Biowissenschaften in die Material- und Werkstoffforschung derzeit eher schwach ausgeprägt.

Mit dem Rahmenprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Förderung der Material- und Werkstoffforschung „Vom Material zur Innovation“ wurde diese Lücke im Fördersystem adressiert. Folgerichtig weist das Programm auf den zunehmenden Trend der „Biologisierung“ hin: „Die Funktionalität und Komplexität der Biomaterialien hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Leisteten Biomaterialien der ersten Generation noch eine rein mechanische Unterstützung, wie zum Beispiel in Implantaten oder künstlichen Gelenken, treten moderne Varianten bereits gezielt mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung. Dies kann durch Wirkstoffbeschichtung, Strukturierung oder durch ein biobasiertes Material erfolgen. Dieser Trend der ‚Biologisierung‘ wird in den nächsten Jahren weiter zunehmen, so dass Biomaterialien ganz neue Potenziale nicht nur in der regenerativen Medizin eröffnen.“¹⁹⁹

In diesem Kontext wird bioinspirierten oder biomimetischen Materialien nach dem Vorbild der Natur besondere Bedeutung innerhalb des Rahmenprogramms beigemessen.

Einzelne der in dieser acatech DISKUSSION beschriebenen Anwendungsfelder, wie die Aufklärung und Nutzung von natürlichen Struktur- und Funktionsprinzipien oder die Verwendung biogener Ausgangsmaterialien, finden sich unter anderem in weiteren Rahmenprogrammen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wieder. So konnte beispielsweise mit der Förderung bildgebender Verfahren über das Rahmenprogramm „Photonik Forschung Deutschland – Licht mit Zukunft“ der Erkenntnisgewinn in den Lebenswissenschaften gesteigert werden. Im Jahr 2001 hat die deutsche Regierung den Forschungsschwerpunkt Biophotonik ins Leben gerufen: ein multidisziplinäres Programm zur Entwicklung optischer Lösungen für biologische und medizinische Fragestellungen.

Der Förderung von biogenen Ausgangsmaterialien wird besondere Bedeutung zuteil. In diesem Kontext ist vor allem die „Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ unter Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zu nennen. Im Mittelpunkt stehen dabei sowohl nachwachsende Rohstoffe als auch biobasierte Prozesslösungen, die auf die gesamte Bandbreite biologischer Ressourcen bis hin zu Mikroorganismen und Zellen sowie auf einzelne biologische Bestandteile zurückgreifen. Im Rahmen der 2010 gestarteten BMBF-Initiative „Nächste Generation biotechnologischer Verfahren – Biotechnologie 2020+“ wird zum Beispiel versucht, biologische Vorgänge zur Stoff- und Energieumwandlung nachzuahmen, indem Ingenieur- und Lebenswissenschaften zusammengeführt werden. Beispiele hierfür sind unter anderem Forschungsprojekte zu mikrobiellen Brennstoffzellen und künstlicher Photosynthese.

Mit dem Programm „Nachwachsende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) soll vorrangig angewandte Forschung und Entwicklung zu nachhaltiger Erzeugung und Nutzung nachwachsender Ressourcen gefördert werden. Das Programm bezieht sich auf a) Rohstoffpflanzen aus der Land- und Forstwirtschaft sowie aquatische Biomasse, b) biogene Reststoffe (Abfälle mit Verwertungspotenzial, Nebenprodukte) aus Land- und Forstwirtschaft, Aquakultur, verarbeitender Industrie, Gewerbe und Haushalten, c) Erzeugung, Bereitstellung, Verarbeitung und Nutzung nachwachsender Ressourcen, d) ressourceneffiziente und umweltschonende Herstellung biobasierter Produkte und Bioenergieträger sowie e) übergreifende Themen einschließlich eines Dialogs mit der Gesellschaft.

Erste Ansätze, Strukturen und Funktionen der Natur in technische Anwendungen zu überführen, wurden mit der Fördermaßnahme „BIONA – Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Im Rahmen zweier Ausschreibungen (2007 und 2008)²⁰⁰ wurden praxistaugliche, nachhaltige Entwicklungen mit bionischem Ansatz gefördert.²⁰¹ Ziel der Fördermaßnahme war es, innovative bionische Ansätze in Prototypen und Demonstrationsmodelle umzusetzen und damit den Weg für eine industrielle und wirtschaftliche Anwendbarkeit zu ebnet. Dazu sollten strukturelle, funktionale und verfahrenstechnische Prinzipien aus der belebten Natur in technische oder andere anwendungsorientierte Disziplinen übersetzt und in Richtung wettbewerbsfähiger Produkte

199 | Siehe Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015, S. 34.

200 | Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2006.

201 | Vgl. BIONA 2019.

und Verfahren weiterentwickelt werden. Angesiedelt war die Maßnahme BIONA im Rahmenprogramm FONA – Forschung für Nachhaltigkeit²⁰², welches zur Bewältigung der globalen Herausforderungen bezüglich Klimaforschung und Ressourcenschonung gestartet wurde. Schlüsseltechnologien wie die Materialforschung und die Nanotechnologie sind dabei wichtige Forschungsfelder für nachhaltige Entwicklungen. Ziel ist es, wirtschaftsstrategische Rohstoffe intelligenter und effizienter zu nutzen und so zur nachhaltigen und sicheren Rohstoffversorgung Deutschlands beizutragen.

Weitere fachspezifische Anknüpfungspunkte einer biologisierten Material- und Werkstoffforschung ergeben sich unter anderem zum Rahmenprogramm Gesundheitsforschung der Bundesregierung, welches das Ziel verfolgt, Forschungsergebnisse schneller in die medizinische Versorgung von Patientinnen und Patienten zu überführen. An der Schnittstelle von Biologie und Technik liefert Materialforschung Lösungsansätze, zum Beispiel für langlebige Implantate, und trägt hierbei entscheidend zur Erschließung des Aktionsfelds individualisierte Medizin bei.

Diese Kurzanalyse der Forschungsförderung im Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung macht deutlich: Während durch die Förderung der Grundlagenforschung in den letzten Jahren entscheidende Fortschritte bei der „biologisierten Material- und Werkstoffforschung“ erzielt werden konnten, wird diese Forschungspriorität trotz ihres Innovationspotenzials für den Forschungs- und Industriestandort Deutschland nur in einzelnen ausgewählten Aspekten in den gegenwärtigen Rahmenprogrammen des Bundes berücksichtigt.

Ein möglicher Ansatz, der „biologisierten Material- und Werkstoffforschung“ ein stärkeres Gewicht im förderpolitischen Kontext einzuräumen, besteht darin, das Themenfeld in der ressortübergreifenden Agenda „Von der Biologie zur Innovation“, die im Koalitionsvertrag zur 19. Legislaturperiode, Kapitel IV, vereinbart wurde, zu berücksichtigen. Diese setzt sich zum Ziel, biologisches Wissen, biologische Prinzipien, biobasierte Materialien sowie biotechnologische Verfahren noch stärker in alle Bereiche unseres Lebens und Wirtschaftens zu integrieren. Für die im Rahmen des Agenda-Prozesses noch zu definierenden Forschungs- und Förderschwerpunkte im Kontext der Material- und Werkstoffforschung stellt diese acatech DISKUSSION eine wichtige Blaupause dar.

11.5 Interviews Verbände und Institute

11.5.1 Interview Frank O. R. Fischer, DGM

Dr. Frank O. R. Fischer ist geschäftsführendes Vorstandsmitglied der DGM.

Herr Dr. Fischer, welche Bedeutung hat Ihrer Meinung nach die Biologisierung der Materialwissenschaften in Deutschland, und wie hoch schätzen Sie das Innovationspotenzial ein?

Diese bioinspirierten Materialien haben ein enormes Potenzial, aber was die Translation der Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung in die Anwendung angeht, tun wir uns noch schwer.

Wie kann man den Transfer Ihrer Meinung nach verbessern?

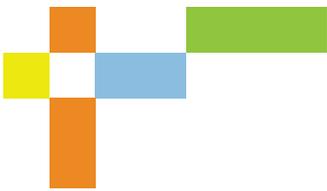
Das Thema ist schon einigermaßen im Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) angekommen, und ich verspreche mir, unter anderem auch von dieser Studie, dass dort die entsprechenden Entscheidungen getroffen werden, beispielsweise eine Förderinitiative anzulegen, um diesen Prozess zu beschleunigen.

Wo würden Sie die Hürden beim Transfer in die Anwendung sehen?

Ich glaube, dass die Wissenschaft eine gewisse Bringschuld hat, ihre Forschungsergebnisse insbesondere der mittelständischen Industrie näherzubringen. Der Mittelstand hat weniger Technologiescouts, die solche neuen Technologien ins Unternehmen tragen könnten. Ich kann mir auch vorstellen, dass mithilfe der interdisziplinären Frühförderung (IFF) oder durch BMBF-Förderung ein großer Beitrag geleistet werden kann.

Was sind aus Ihrer Sicht die großen Herausforderungen für die Entwicklung und Umsetzung in den nächsten Jahren?

Nachdem die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) drei größere Schwerpunktprogramme in den letzten Jahren gefördert hat, ist es nun an der Zeit, dass das BMBF in eine Umsetzungsphase investiert. Ich denke, das Potenzial ist da, es ist aufgezeigt worden und muss jetzt in entsprechenden langfristigen Programmen bis zum Prototyp umgesetzt werden, so wie das zum Beispiel beim Thema Ressourceneffizienz gemacht wurde. Das wird teilweise durch die IFF – durch das



Wirtschaftsministerium getrieben – gemacht, aber ich denke, auch das BMBF könnte hier einen wichtigen Beitrag leisten.

Wie würden Sie da Deutschland im internationalen Vergleich einordnen?

Soweit ich das übersehe, sehe ich Deutschland ganz klar unter den Top 5! Was die Grundlagenforschung betrifft, sehe ich uns an der Weltspitze, und wenn wir jetzt die richtigen Schritte einleiten, werden wir die Exzellenz in der Forschung in Arbeitsplätze und Wohlstand umsetzen können.

Und wie sehen Sie Deutschland im internationalen Vergleich in Bezug auf das Innovationspotenzial?

Zu konservativ und zu wenig experimentierfreudig! Das hat dazu geführt, dass viele Technologien anderswo umgesetzt werden, obwohl sie hier das erste Mal das Licht der Welt erblickt haben. Ich glaube, der Gründergedanke muss auf die bioinspirierte Werkstoffwissenschaft überspringen, dann hat das Ganze auch ein Potenzial, umgesetzt zu werden.

Was ist Ihrer Meinung nach nötig, um zu gewährleisten, dass Deutschland in diesem Forschungsfeld Fortschritte verzeichnet und im internationalen Vergleich mithalten kann?

Bisher fehlt es an einem fortführenden Programm, welches die Erkenntnisse der letzten drei großen DFG-Schwerpunktprogramme aufgreift und in einer BMBF-Förderung umsetzt. Da gibt es Beispiele, wie die Gradientenwerkstoffe, die aus der Grundlagenforschung in die anwendungsbezogene Forschung überführt wurden und dort ein Erfolg wurden. Dieses Modell sollte man fortführen.

11.5.2 Interview Kurt Wagemann, DECHEMA

Prof. Dr. Kurt Wagemann ist Geschäftsführer der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.

Herr Dr. Wagemann, was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in der Material- und Werkstoffwissenschaft in den letzten Jahren?

Da gibt es drei Entwicklungen, die mir wichtig erscheinen. Ein Thema sind Zellkulturen und die Adhärenz von Zellen. Es wurden große Fortschritte gemacht, die Zellen am Leben zu halten. Hierbei geht es weniger um das Lernen von der Natur als darum, lebende Strukturen in technischen Systemen zu nutzen.

Zweitens finde ich auch die schaltbare Funktionalisierung von Oberflächen spannend, zum Beispiel hydrophil und hydrophob. Und schließlich erwarte ich drittens einiges von hierarchischen Strukturen an Oberflächen; ein Beispiel ist das Thema Gecko-Füße und Haftung (siehe Kapitel 7.1).

Welche Bedeutung hat das Thema für Deutschland, und wie schätzen Sie das entsprechende Innovationspotenzial ein?

Für die Herstellung von Chemikalien und Werkstoffen wird die Biotechnologie sicherlich immer wichtiger werden. In der ganzen Breite des Themas Biologisierung würde ich sowohl die Bedeutung als auch das Innovationspotenzial als mittelgroß einschätzen. Ich halte es für sehr wertvoll, sich damit zu beschäftigen, die Zahl der zu erwartenden Durchbrüche sehe ich jedoch als begrenzt an; es wird sicher welche geben. Wie allerdings beim Thema Nanotechnologien vor 25 Jahren, wo man die Lösung aller Probleme sah, werden gerade auch hier bei der Biologisierung ähnlich hohe – vielleicht zu hohe – Erwartungen diskutiert.

Aber was sind da die großen Hürden und Herausforderungen für die Umsetzung?

Ich sehe keine fundamentalen Hürden. Forschung und Entwicklung müssen natürlich unterstützt werden, aber der Rahmen ist da. Die Gentechnik hat zum Beispiel mit ganz anderen regulatorischen Hürden und Akzeptanzfragen zu kämpfen. Im Gegenteil, ich glaube, wenn man Akzeptanz in der Bevölkerung als eine wichtige Hürde definiert, dann hat die Biologisierung beste Karten.

Wie würden Sie Deutschland im internationalen Vergleich positionieren?

Gut bis sehr gut. In der Grundlagenforschung sicher sehr gut, bei der anwendungsorientierten Forschung hat sich die Fraunhofer-Gesellschaft das Thema auf die Fahnen geschrieben, mehr kann man eigentlich nicht wollen. In der Industrie sehe ich nicht viel Aktivität. Ich glaube, dort wartet man eher ab, was an neuen Ideen hochkommt. Aber das ist die generelle Einstellung der Industrie bei Themen dieser Art – immer von Ausnahmen abgesehen.

Was ist Ihrer Meinung nach nötig, um zu gewährleisten, dass Deutschland in diesem Forschungsfeld Fortschritte verzeichnet und im internationalen Vergleich mithalten kann?

Das Thema Transfer treibt die Politik heute sehr stark um, und da gibt es Defizite, ohne dass ich die jetzt speziell nur in Deutschland sehen würde. Der Transfer über Köpfe sollte nicht

unterschätzt werden, also gute und vor allem gut ausgebildete Leute, die aus den Forschungseinrichtungen kommen und Know-how in die Industrie bringen. Aber zum Thema Transfer über Köpfe gehört letztlich auch die Unternehmensgründung. Da haben wir Defizite in Deutschland.

Haben Sie eine Idee, wie das verbessert werden kann?

Ich glaube, es gibt gute Einzelfälle, wo vieles bewegt wird, zum Beispiel denke ich da immer an die TU München, die sich ja als Gründeruniversität positioniert. Dem Beispiel sollten andere folgen. Ich denke, dass ein explizit ausgewiesenes Förderprogramm für solche Bestrebungen vonseiten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) aufgelegt werden sollte, wobei das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) mit dem EXIST-Programm schon sehr viel leistet, sobald das Konzept für eine Unternehmensgründung vorliegt. Wenn das BMBF das Stichwort „Biologisierung“ im Zusammenhang mit Materialforschung, aber auch für die zugehörige Prozessentwicklung aufgreift, dann wäre das hilfreich, um verstärkt Aufmerksamkeit für das Thema zu wecken. Wichtig erscheint mir auch das Thema transdisziplinäre Forschung in diesem Zusammenhang. Hier ist mein Standpunkt, dass klassische Fächer studiert werden sollten. Dann sollte es aber Anreize geben, sich für die Nachbargebiete zu interessieren und sich mit deren Fragestellungen zu beschäftigen. Generell gilt es, Lücken zu überbrücken, sei es zwischen verschiedenen Fächern, aber auch auf dem Weg vom Labor bis zur marktreifen Anwendung.

11.5.3 Interview Ljuba Woppowa, VDI

Dr. Ljuba Woppowa ist Geschäftsführerin der VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences und der VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen.

Frau Dr. Woppowa, was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in den Materialwissenschaften in den letzten Jahren?

Ich sehe zwei große, wichtige Themen: zum einen die Bioprinting-Verfahren. Dazu haben wir Ende Juni 2019 ein VDI-Expertenforum veranstaltet und parallel mehrere Artikel in den VDI Nachrichten publiziert. Schon die Entwicklung der Additiven Fertigung von Kunststoffen und dem Drucken von metallischen Materialien war ein großer Schritt, aber die Additive Fertigung von biologischem Material und Gewebe ist eine spektakuläre Innovation in der Materialentwicklung und ein großer technologischer Schritt in die Zukunft. Mit diesen Verfahren eröffnen sich

wichtige Chancen und Möglichkeiten in der Medizintechnik. Das zweite Thema, auch durch die Additive Fertigung getrieben, ist der Leichtbau insgesamt. Im Bereich Bionik konnten wir ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen schon lange berechnen und am Vorbild der Natur optimieren. Jetzt wird durch die neuen Druckverfahren auch die Herstellung ermöglicht.

Welche Bedeutung würden Sie dem Thema in Deutschland einräumen, und wie schätzen Sie das Innovationspotenzial ein?

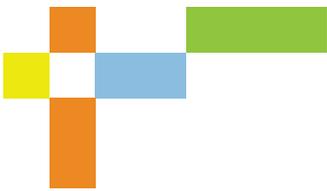
Für mich hat das Thema Biologisierung einschließlich Bioökonomie in Deutschland eine sehr hohe Priorität, und ich stelle fest, dass wir viele innovative Trends setzen, die keiner so intensiv ausarbeitet wie wir in Deutschland. Das Thema Digitalisierung war zum Beispiel vor fünf Jahren noch sehr nebulös, aber die konkrete Umsetzung und die praktischen Anwendungen sind in den letzten Jahren auch mit der Anstrengung aller Industrien und Verbände erst deutlich geworden. Ich sehe das beim Thema Biologisierung ganz genauso.

Was genau sind die Hürden, die es zu überwinden gilt?

Die biobasierten Materialien sind im Vergleich zu den traditionellen – das heißt erdölbasierten – Materialien immer noch zu teuer und damit nur bedingt wettbewerbsfähig. Neben der günstigen Kohle aus China und dem Shale Gas aus USA hat die Biotechnologie noch nicht den Dreh gefunden, die Produkte so preiswert zu machen und in der Masse zu produzieren, damit sie sich am Markt etablieren können. Trotzdem bin ich der Meinung, dass sich gerade diese Technologien entwickeln müssen, damit wir dann, wenn wir sie zum Beispiel bei Rohstoffknappheit dringend brauchen, nicht ins Hintertreffen geraten. Deshalb müssen wir auch beim Thema biologische Verfahren unser Bestes geben und am Puls von Forschung und Technik bleiben! Zunehmend wichtiger wird das interdisziplinäre Arbeiten. Der gegenseitige Austausch von Biotechnologie mit klassischer Chemie und Verfahrenstechnik ist entwicklungsfördernd. Zusätzlich müssen die Themen Künstliche Intelligenz und Big Data in die Curricula der klassischen Studiengänge integriert werden.

Wie setzt man das um?

Hier besteht ressortübergreifender förderpolitischer Bedarf: Das BMBF hat etwa die Bionik zehn Jahre lang mit der BIONA-Maßnahme gefördert. Wichtige Themen und Leuchtturmprojekte, die daraus entstanden sind, wurden nicht weiterverfolgt, weil eine ressortübergreifende Förderung nicht möglich war. Die Bio-Agenda des BMBF ist ein Schritt in die richtige Richtung,



aber weitere Schritte müssen folgen, um das Valley of Death zu überwinden und Forschungsprojekte in die industrielle Anwendung zu überführen. Es ist ein kontinuierlicher Prozess in der Forschungsförderung notwendig, um das „Upscaling“ zu gewährleisten; dafür muss ein neues Förderkonzept gestaltet werden. Man kann nicht den Sprung vom Reagenzglas direkt in die Großproduktion schaffen, diese Lücke muss ressortübergreifend und unter Beteiligung aller Akteure aus Forschung, Industrie und Anwendung geschlossen werden.

11.5.4 Interview Viola Bronsema, BIO Deutschland e.V.

Dr. Viola Bronsema ist Geschäftsführerin von BIO Deutschland, dem Branchenverband der Biotechnologieindustrie.

Frau Dr. Bronsema, was war für Sie eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Biologisierung in den Material- und Werkstoffwissenschaften in den letzten Jahren?

Innovationen müssen sich heute nicht mehr nur an ihrem Neuigkeitswert und dem aktuellen Bedarf messen lassen, sondern auch an ihrer Nachhaltigkeit. Spannend finde ich in dem Kontext die Kombination aus Bioinspiration und Nachhaltigkeit, die wir gerade jetzt im Hinblick auf die Diskussionen über Bio-Transformation und die Bio-Agenda nicht aus den Augen verlieren sollten. Sobald diese beiden Aspekte zusammenkommen, sind alte Bekannte wie Biotechnologie und Bioökonomie nicht weit. Die Spinnenseide-Entwicklungen der Firma AMSilk sind ein Paradebeispiel für Bioinspiration und Nachhaltigkeit: Dieses stabile Material ist vielfältig nutzbar – unter anderem als Industriefaser, als Wundabdeckung oder als Beschichtung von Transplantaten – und gleichzeitig nachhaltig. Es ist biologisch abbaubar und verschlechtert unsere Plastikbilanz nicht weiter.

Ein anderes Beispiel ist der 3D-Druck: Damit können mittlerweile patientenangepasste Prothesen hergestellt werden, möglicherweise sogar aus biobasierten Materialien. Das finde ich faszinierend. Da tun sich ganz neue Felder auf, auch im Zuge der Medizininformatik, Digitalisierung und der ganzen E-Health-Thematik. Hier können wirklich für unsere Gesellschaft relevante Fortschritte gemacht werden. Denn bei aller Liebe zu selbstreinigenden Oberflächen oder Space Shuttles – die eigentliche Herausforderung ist im Moment doch, so biologisch und ökologisch wie möglich zu sein und das Kreislaufdenken zu etablieren.

Wichtig ist zudem die Diskussion, was eigentlich ein neues Material ist. Oft ersetzt im Grunde genommen ein sogenanntes neues Material nur ein altes, zum Beispiel wenn ein fossilbasiertes durch ein aus Biomasse hergestelltes Material ersetzt wird. Wir müssen aber auch diskutieren, welche wirklich neuen Materialien mit bestimmten physikalischen und chemischen Eigenschaften wir für das Meistern zukünftiger Herausforderungen benötigen. Im Moment gibt es „nice to have“ und „need to have“. Da müssen wir priorisieren.

Welche Bedeutung hat das Thema in Deutschland Ihrer Meinung nach, und wie hoch schätzen Sie das entsprechende Innovationspotenzial ein?

Wir lernen doch eigentlich schon immer von der Biologie. Flugzeuge und die Aerodynamik im Allgemeinen wurden einst vom Vogelflug abgeguckt. Wir nutzen die Biotechnologie seit Jahrtausenden zur Herstellung und Veredelung von Nahrungsmitteln. Das Innovationspotenzial ist aber bei Weitem nicht ausgeschöpft. Es gibt verschiedene Schätzungen, wie viel Prozent der weltweiten chemischen Produktion 2030 biobasiert sein wird, und die reichen von 25²⁰³ bis 40²⁰⁴ Prozent. Das Potenzial ist also auf alle Fälle groß. Auch der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), bei dem wir Mitglied sind, hat jetzt die Themen Biologisierung, Bioökonomie, Life Sciences und Biotechnik mit auf die Agenda genommen. Das halten wir auch für notwendig. Innovation funktioniert nur, wenn wir eine Konvergenz der Technologien erreichen und auch die Traditionsindustrien für diese neuen Ansätze, Materialien und Prozesse gewinnen können. Wir haben gerade einen Technologie-Push, sind also schon recht weit in vielen Ansätzen, uns fehlt aber noch der Market Pull, um neue Wertschöpfungsketten aufzubauen.

Was sind denn die Hürden und Herausforderungen?

Das beharrliche Bestehen auf den alten „Claims“ und Wegen: Das Gute ist immer der Feind des Besseren. Wir sind dem BDI beigetreten, um aufzuzeigen, dass die weltweiten Entwicklungen in der Bioökonomie mit Bedarf an neuen Sensoren, Maschinen und Produktionsstraßen auch Chancen für die Traditionsindustrien bieten – das sollen wir einfach gemeinsam angehen. Über diese neuen Verfahren können wir auch den Klimazielen näherkommen. Wir wissen, dass das Erzeugen von CO₂ teurer werden wird – die Firmen müssen sich umstellen. Der Knackpunkt ist im Moment das „Upscaling“: Es ist riskant, „auf gut Glück“ größere Anlagen zu bauen, um zum Beispiel die Machbarkeit

203 | Vgl. Road to Bio 2019.

204 | Die Hochrechnung wurde im Rahmen eines internen Workshops erstellt.

und die Wirtschaftlichkeit im industriellen Maßstab zu zeigen. Da haben wir ein Marktversagen. Hier braucht es Investitionen. Wenn wir das gemeinschaftlich wollen, müssen wir es auch schaffen, die Politik und Gesellschaft davon zu überzeugen. Aber wir wollen – wie gesagt – nicht Innovation um jeden Preis, sondern Innovationen mit Nachhaltigkeitspotenzial.

Gibt es Defizite, die Sie in der Kommunikation sehen, wenn es um Bioökonomie und Nachhaltigkeit geht?

Beim Begriff „Bioökonomie“ ist die Kommunikation irgendwie schiefgegangen. Natürlich ist auch ein Baumwollshirt biobasiert. Aber darum geht es ja im Moment nicht wirklich, oder? Das Entscheidende ist, dass wir wissensbasierte biobasierte Innovationen schaffen und zukünftige Herausforderungen mitdenken. Bioökonomie ist nicht per se nachhaltig. Das dürfen wir nicht vergessen. Nachhaltigkeit müssen wir aktiv verfolgen.

Wie kommen wir da voran?

Die Industrieforschung muss weiter gefördert werden. Und die Forschungsförderung muss so ausgestaltet sein, dass eine bestmögliche Zusammenarbeit zwischen Start-ups, Mittelständlern, Akademie und Großindustrie stattfinden kann. Wichtig ist auch, dass wir die Wertschöpfungsketten insgesamt in den Blick nehmen. Und natürlich müssen auch die politischen Entscheidungsträger und die Verwaltungen einbezogen werden, wenn es zum Beispiel um Rahmenbedingungen und Regulierung geht.

Wie positionieren Sie Deutschland im internationalen Vergleich?

Ich möchte gerade jetzt, da überall nur die Rede von der Digitalisierung ist, betonen, dass die Biologisierung und insbesondere die Ingenieurs- und Biotechnologieansätze sehr gut zu uns passen. Wir sind doch das Land der Bierbrauer und Hunderter von Brotsorten – wir können das einfach gut. Und wir haben sehr gute Ingenieure. Die Biologisierung ist uns von der Mentalität her auf den Leib geschneidert! Der Nachteil ist, dass wir sehr satt sind und dass das Thema Nachhaltigkeit und „Bio“ momentan eher im Zusammenhang mit Öko, Schruppelmöhre sowie dem Verzicht auf Plastiktüten und Rindersteaks gesehen wird. Es fehlt noch der Ansatz in der Gesellschaft und Politik, dass „Bio“ auch mit Innovation und Hightech einhergehen kann. Vielleicht ist es auch „Bio“, wenn man in der Künstlichen Intelligenz von neuronalen Netzwerken lernt oder eine Maschine wie ein Gecko die Wand hochlaufen kann (siehe Kapitel 7.2). Nur nachhaltig sollte es perspektivisch schon sein. Sonst ist es nicht zeitgemäß.

11.5.5 Interview Alexander Böker, Fraunhofer IAP

Prof. Dr. Alexander Böker ist Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP in Potsdam-Golm und Inhaber des Lehrstuhls „Polymermaterialien und Polymertechnologien“ an der Universität Potsdam. Am Fraunhofer IAP werden biobasierte und synthetische Polymere entwickelt, die effizient, intelligent und nachhaltig sind – vom Labor bis in den industrienahen Maßstab.

Prof. Böker, was verstehen Sie unter dem Begriff der Biologisierung der Materialwissenschaften?

Ganz allgemein gesprochen werden Prinzipien der Natur auf Materialien übertragen. Dazu zählt beispielsweise, dass biogene Rohstoffe für Materialien genutzt werden. Der Klassiker ist alles, was man aus Holz gewinnen kann: Zellulose, Lignin etc. Hier wird also die reine Biomaterialeseite beleuchtet. Mit diesen eher traditionellen Entwicklungen beschäftigen wir uns am Fraunhofer IAP. Aber auch alternative Verarbeitungsmethoden wie der 3D-Druck oder die biologische Funktionalisierung von Oberflächen und deren Wechselwirkung mit der Umgebung sind für uns wichtige Forschungsthemen.

Wir versehen also Materialien mit biologischen Funktionen. Dazu bringen wir biologische Bausteine, die von der Natur seit Jahrmillionen entwickelt wurden, auf eine Oberfläche oder auch direkt in Materialien ein. Beispielsweise arbeiten wir an neuartigen Polymerfolien, in die natürliche Proteine oder Enzyme integriert sind, die wie in ihrer natürlichen Umgebung wirken sollen. Solche Systeme sind zum Beispiel für die Pharmabranche für die Entwicklung von Medikamenten oder auch für die Verpackungsindustrie sehr interessant. Die Proteine und Enzyme können dabei biotechnologisch so verändert werden, dass sie stabiler sind. Denn sie müssen ja beispielsweise auch den Verarbeitungsprozess des Polymermaterials überstehen. Im Sinne einer „Directed Evolution“ können wir den Biomolekülen auch erweiterte Funktionen verleihen, die sie im natürlichen Umfeld nicht besitzen. Das ist unser Ansatz für neue „biologisierte“ Materialien.

Interessant sind auch die Ansätze, in denen man von der „wachsenden Natur“ ausgeht: Werkzeuge und Maschinen sollen so konstruiert werden, dass sie sich selbst regenerieren können und es keine Abnutzung mehr gibt. Das ist natürlich weit in die Zukunft gedacht, aber irgendwann muss man ja damit anfangen.



Wie schätzen Sie das entsprechende Innovationspotenzial ein?

Die Biologisierung beziehungsweise biologische Transformation der Produktion und der Werkstoffforschung ist nicht umsonst eine der prioritären strategischen Initiativen innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. Dieses Thema hat das Potenzial für disruptive Innovationen. Einerseits lassen wir uns von der Natur für neue Materialfunktionalitäten inspirieren, andererseits helfen Bioverträglichkeit und Bioabbaubarkeit, die Abfallproblematik bestimmter Materialien anzugehen. Sicherlich ist Bioabbaubarkeit hier nicht der Weisheit letzter Schluss, sondern wir müssen von Fall zu Fall entscheiden, ob Bioabbau oder ein geschlossener Recyclingzyklus sinnvoller ist. Schließlich führt aber jede Entwicklung von „biologisierten“ Materialien zu einer komplett neuen Materialklasse, indem wir über die üblichen chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Materials hinausgehen und eine biologische Aktivität beziehungsweise Eigenschaft hinzufügen.

Sehen Sie denn auch Hürden oder Herausforderungen?

Dass es sich um eine komplett neue Materialklasse (mit biologischen Funktionen) handelt, bietet unheimliche Chancen. Aber – es ist wie bei jeder neuen Technologie: Bis sie sich durchsetzt, dauert es eine Weile. Stichwort: Akzeptanzprobleme. Eine weitere Hürde sehe ich in der Interdisziplinarität bei diesem Thema. Um solch neue Materialien für Anwendungen in Produkten zu generieren oder überhaupt in diese Richtung zu gehen, brauche ich Fachkräfte aus der Biotechnologie, Mikrobiologie, aber auch aus der Physik, der Physikalischen Chemie und Chemie und schließlich aus den Ingenieurwissenschaften und aus dem Design. Eigentlich müssen viele komplexe Disziplinen, die nicht unbedingt gewohnt sind, miteinander zu arbeiten, von Anfang an ineinandergreifen, um langfristig erfolgreich zu sein. Das führt schließlich zu dem Anspruch, die naturwissenschaftliche Ausbildung interdisziplinärer aufzustellen.

12 Internationale Perspektiven

Dieses Kapitel stellt anhand von Interviews einige ausgewählte internationale Zentren für biologisch inspirierte Materialforschung vor.

12.1 Interview Don Ingber, Wyss Institute at Harvard University, Boston, USA²⁰⁵

Prof. Dr. Donald E. Ingber ist Gründungsdirektor des Wyss Institute for Biological Inspired Engineering an der Harvard University, Judah Folkman Professor für Gefäßbiologie an der Harvard Medical School und des Programms für Gefäßbiologie am Boston Children's Hospital sowie Professor für Bioingenieurwesen an der Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences.

Herr Prof. Ingber, was machen Sie am Wyss-Institut anders, und wie gehen Sie vor, um Innovation zu schaffen?

Wir haben das Wyss Institute vor zehn Jahren gegründet. Die Herausforderung bestand darin, zu überlegen, wo das Bioengineering in den nächsten dreißig Jahren stehen würde. Wir haben zurückgeblickt und festgestellt, dass das Ingenieurwesen in der Vergangenheit bereits die Medizin und die Welt verändert hat, indem es technische Prinzipien zur Lösung medizinischer Probleme angewendet hat. Wir hatten jedoch das Gefühl, dass wir bereits genug darüber wissen, wie die Natur im Nanomaßstab baut, kontrolliert und produziert, und dass wir nun in der Lage waren, biologische Prinzipien zur Entwicklung neuer technischer Innovationen heranzuziehen. Das nennen wir „Biological Inspired Engineering“. Die Natur hat keine getrennten Abteilungen für Chemie, Biologie, Physik oder Kunst. Warum organisiert sich die Wissenschaft so? Wir sind mehr als ein Grundlagenforschungsinstitut, wir sind eher ein Transferinstitut: Wir ignorieren Disziplinengrenzen. Unsere Ideen werden die Welt nicht verändern, wenn sie es nicht aus dem Labor heraus schaffen. Daher umfassten unsere Erfolgskriterien für das Institut von Anfang an ein „Intellectual Property Portfolio“, Allianzen mit Unternehmen, Lizenzvereinbarungen, Start-ups und die

tatsächliche Vermarktung von Produkten! Wir hatten zu Beginn eine Schenkung für fünf Jahre von 125 Millionen Dollar, die größte Schenkung in der Geschichte von Harvard. Wir haben es vor fünf Jahren verdoppelt und erst kürzlich angekündigt, dass wir es verdreifacht haben. Es war ein unglaubliches Abenteuer!

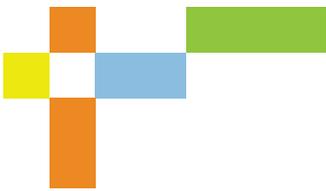
Sie haben also all diese Erfolgskriterien miteinbezogen. Und wie funktioniert das jetzt in der Praxis?

Durch unsere eigene, neuartige Struktur, über die wir auch einen Übersichtsartikel²⁰⁶ verfasst haben. Eines der neuartigsten Dinge, die wir unternommen haben, war die Einstellung von über vierzig festangestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus der Industrie, von denen viele Erfahrung in der Produktentwicklung mitbringen und die im Idealfall über Management-erfahrung und Teammanagementfähigkeiten verfügen. Wir nennen sie unser Advanced Technology Team (ATT). Einige Institute stellen Leute aus der Industrie ein, um in ihren Kern-einrichtungen zu arbeiten, aber unsere Leute sind wirklich mit den Studierenden, Stipendiaten und Dozierenden in Kontakt und kommen aus allen möglichen Unternehmen. Dies bringt ein Maß an Interdisziplinarität mit sich sowie einen Transferfokus, den es so normalerweise nicht in der akademischen Welt gibt. Wir haben Leute, die wissen, wie man mit Meilensteinen und Zeitplänen umgeht, und das kann den Unterschied ausmachen. Wir geben unseren Forscherinnen und Forschern genügend Mittel, um ein bis zwei Studierende oder Fellows einzustellen, und wir geben ihnen volle kreative Freiheit, nur zu „spielen“. Damit wird eine Arbeitsweise ermöglicht, die ich „Skunk Works“ der Wissenschaft nenne. Unsere Forscherinnen und Forscher müssen keine Zeit zum Schreiben von Anträgen für Fördermittel aufwenden. Wir haben einfach Leute ausgewählt, die wir für Visionäre halten. Wir bringen sie zusammen, um Probleme zu lösen, die nicht von Einzelpersonen zu lösen sind, und es entstehen spontane Kooperationen. Die relativ geringen Mittel, die wir Einzelpersonen zur Verfügung stellen, dienen dazu, die Ideenfindung zu unterstützen und die Pipeline zu befeuern. Am Ende dreht sich alles um Menschen.

Auch haben wir bei der Gründung des Instituts sogenannte Enabling Technology Platforms geschaffen, bei denen wir Visionären in unseren Schwerpunktbereichen Mittel und deren vollständige Kontrolle zur Verfügung stellen. Wir fordern jedoch, dass diese Mittel verwendet werden, um auch Aktivitäten anderer Kollegen zu ermöglichen, damit alle auf kollaborative Weise zusammenkommen. Wichtig ist, dass wir nicht Einzelpersonen, sondern den Projekten Raum geben. In sogenannten

205 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.

206 | Vgl. Tolikas et al. 2017.



Collaboratories bringen wir Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus verschiedenen Laboren zusammen, um am selben Projekt zu arbeiten. In einem späteren Stadium haben wir auch Validierungsprojekte und Institutsprojekte, die eher von den festangestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern angetrieben werden und sich auf die Technologievalidierung sowie die Geschäftsentwicklung konzentrieren. Unser Modell ist ein ganz anderes als das der Wissenschaft! Der Erfolg hängt davon ab, welche Teammitglieder gut zusammenarbeiten und dass man ihnen nicht im Weg steht. Das ist unser Innovationsmodell.

Es hört sich so an, als würden Sie Interdisziplinarität und Kreativität fördern mit einem Fokus auf Innovation.

Genau das war das Ziel! Und es funktioniert! In den letzten zehneinhalb Jahren haben wir im Durchschnitt jeden Monat einen Science- oder Nature-Artikel veröffentlicht. Und wir haben nur 18 Teilzeitwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler, weil all jene ihre akademischen Anstellungen an ihren Heiminstitutionen in Harvard oder an anderen Universitäten und Krankenhäusern behalten. Dort unterrichten sie und sind in den üblichen Ausschüssen vertreten und haben an beiden Standorten Forschungsaktivitäten. Allerdings verlegen sie ihre eher translatorische Arbeit und ihre eher unternehmerischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an unser Institut. Das hält es lebendig. Wissen Sie, das Ausmaß der Auswirkungen war erstaunlich: Wir haben 31 Start-up-Unternehmen, 57 Lizenzen und mehr als 2.000 Patente abgeschlossen.

Was ist Ihrer Meinung nach das größte Hindernis für Innovation?

Institutionelle Eifersucht und Wettbewerb. Es ist nicht von der Hand zu weisen, dass wir in einer wettbewerbsorientierten Welt leben, aber der Trick ist, es für beide Seiten zu einer Win-win-Situation zu machen.

Haben Sie ein gutes Beispiel für ein Start-up im Bereich der bioinspirierten Materialwissenschaften?

Eines meiner Start-ups, Emulate Inc.,²⁰⁷ vermarktet unsere „Organs-on-Chips-Technologie“. Hierbei handelt es sich um mikrofluide Geräte in der Größe eines Speichersticks, die von lebenden menschlichen Zellen ausgekleidet sind (siehe Abbildung 53). Sie

bilden die Gewebe-Gewebe-Grenzflächen, Strukturen auf Organebene und pathophysiologische Reaktionen lebender menschlicher Organe nach. Emulate vertreibt weltweit Produkte, mit denen Tierversuche in der Arzneimittelentwicklung und Kosmetik sowie in der Grundlagenforschung ersetzt werden. Joanna Aizenberg hat eine Firma namens Advanced Material Technologies Inc., die omniphobe Oberflächen verkauft: Diese verhindern, dass alles festklebt – von Seepocken bis Blut. Das Wyss hat außerdem „Conor Walshs Soft Exosuit“-Technologie an Rewalk Robotics lizenziert, das kürzlich die FDA²⁰⁸-Zulassung für den Verkauf von tragbarer robotischer Kleidung zur Rehabilitation von Schlaganfallpatienten erhalten hat.

Was würden Sie deutschen Entscheidungsträgern empfehlen?

Verwenden Sie Ihre Mittel nicht nur für die vorhandene Universitätsinfrastruktur, sondern machen Sie etwas völlig Neues. Ursprünglich bezog sich der Begriff „Skunk Works“ auf große Firmen, die innovativer werden wollten und eine kleine Gruppe der kreativsten Leute aus dem regulären organisatorischen Umfeld, den alten Berichts- und Mittelstrukturen herausholten, damit diese Leute etwas völlig Neues schaffen können. In Bezug auf Bereiche, die in der Biowelt untersucht werden müssen, gibt es meines Erachtens viele, in denen noch große Fortschritte erzielt werden müssen. Das Mikrobiom ist eines, da es eine so große Rolle für Gesundheit und Krankheiten spielt, und wir sind da noch am Anfang. Ich halte die synthetische Biologie für bedeutend. Der 3D-Druck und andere Arten des Materialdrucks werden ein weiteres aufregendes Gebiet sein, das es zu erkunden gilt, da gibt es noch viel Raum für Fortschritte. Die Regierung sollte aber auch in Organisationen investieren, die bereit sind, Arbeit mit hohen Risiken, aber potenziell großem Ergebnis anzufassen. Sie müssen die besten Leute aus ihren alten Institutionen herausholen und sie mit den besten Leuten innerhalb einer Organisationsstruktur zusammenbringen, die es ihnen ermöglicht, miteinander zu arbeiten. Das muss von den Wissenschaftlerinnen und Ingenieuren, die die entsprechende Vision und Leidenschaft haben, von Grund auf aufgebaut werden. Der Ansatz muss sich aber ein wenig von der Finanzierung der erfolgreichsten Mainstream-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler unterscheiden. Sie müssen den Spieß umdrehen und die Unruhestifter und Außenseiter finden, die die etablierten Vorgehensweisen infrage stellen, aber auch bewiesen haben, dass sie effektiv sein und gut mit anderen zusammenarbeiten können!

207 | Vgl. Emulate Inc. 2019.

208 | Die FDA, die Food and Drug Administration, ist eine US-amerikanische Behörde, die für die Zulassung und Marktüberwachung von Lebensmitteln, Medikamenten und Medizinprodukten verantwortlich ist.

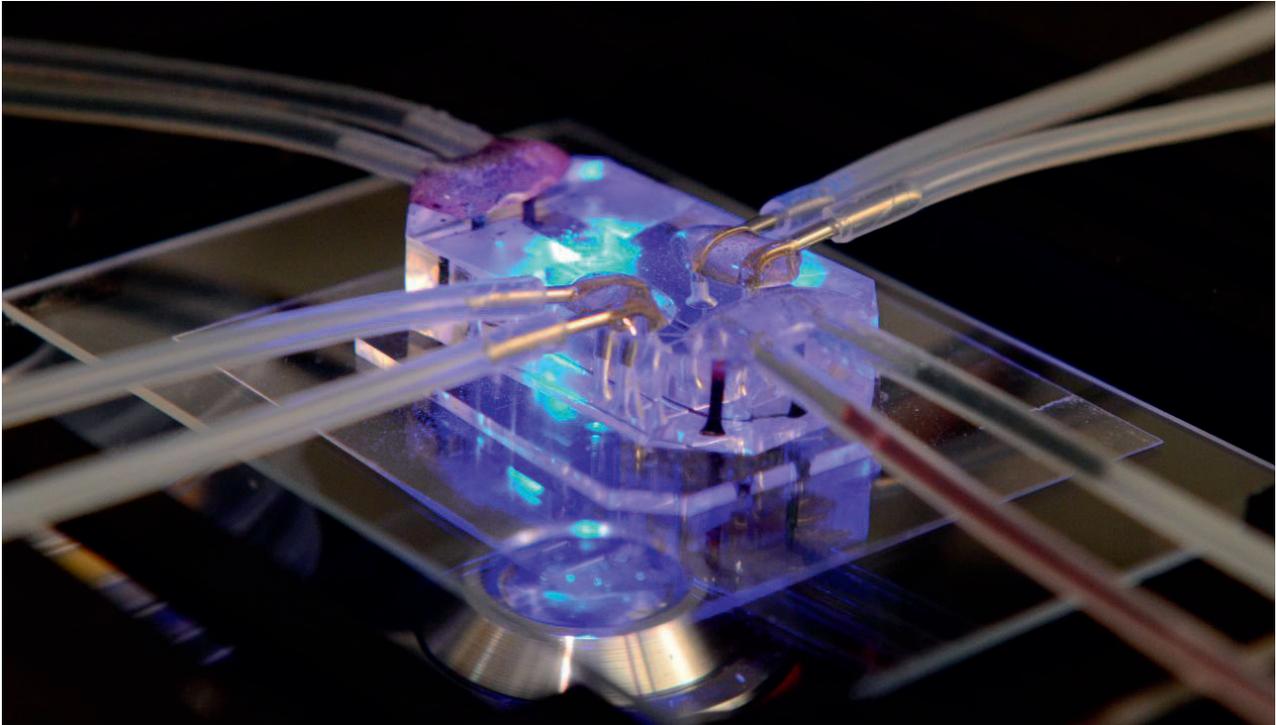


Abbildung 53: Organs-on-Chips sind mit lebenden menschlichen Zellen ausgekleidete mikrotechnisch hergestellte Systeme, die die Funktion einer Vielzahl von Organen – einschließlich Lunge, Darm, Leber, Niere und Gehirn – nachbilden. Dadurch ermöglichen sie eine bessere Vorhersage von Arzneimittelsicherheit und -wirksamkeit beim Menschen und die Entwicklung neuer Therapeutika, indem sie Einblicke in die Mechanismen von Krankheiten geben. Organs-on-Chips haben das Potenzial, die personalisierte Medizin voranzutreiben (Quelle: Wyss Institute at Harvard University).

12.2 Interview Robert Full, UC Berkeley, USA²⁰⁹

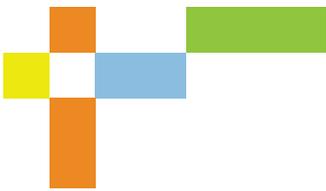
Prof. Dr. Robert J. Full ist Professor im Department für Integrative Biologie²¹⁰ an der University of California in Berkeley. Er ist Gründer und Direktor von CiBER, dem Zentrum für interdisziplinäre Bioinspiration in Bildung und Forschung. CiBER konzentriert sich auf die Entdeckung grundlegender Prinzipien der Biologie, die zu neuartigen Ingenieurtechniken inspirieren und bei denen Ingenieurinnen und Ingenieure Biologinnen und Biologen mit neuen Hypothesen, Ansätzen und Techniken versorgen. Professor Full ist Chefredakteur der Zeitschrift „Bioinspiration and Biomimetics“.

Prof. Full, wie verstehen Sie den Begriff der Biologisierung in den Materialwissenschaften?

Wir versuchen, die zugrunde liegenden Prinzipien von biologischem Material wirklich zu verstehen und nutzbar zu machen. Wenn diese Prinzipien erst einmal extrahiert sind, müssen sie ja nicht eins zu eins kopiert werden, auch wenn das die meisten Leute denken. Wir wissen, dass die Evolution nach einem „Gerade gut genug“-Prinzip arbeitet, nicht nach einem „Optimierungs“- oder „Perfektionsprinzip“. Man muss also die Prinzipien dieser Materialien erforschen und dann auf die technische Seite schauen. Wenn es bereits etwas besser Funktionierendes gibt, muss man sich nicht an den Vorbildern der Natur orientieren. Die Natur ist nur eine weitere Quelle an Gestaltungsideen, und in einigen Fällen sind diese spektakulär gut!

209 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.

210 | Vgl. Poly-PEDAL Lab 2019.



Wie beurteilen Sie die kommenden Entwicklungen und das entsprechende Innovationspotenzial?

Biomaterialien sind unglaublich hierarchisch, sie gehen von winzigen Maßstäben zu sehr großen Superstrukturen. Wir wollen immer mehr, dass diese Materialien mehr als eine Sache tun, wir möchten, dass sie multifunktional sind, dass sie erfassen, aktivieren, berechnen, kommunizieren – das war vor zehn Jahren ein Traum. Und jetzt sehen Sie alle Arten von technischen Materialien, die all diese Dinge können. Wir haben Techniken wie die Biomineralisierung, wir können die Selbstorganisation nutzen, wir können Gefrierguss und Vakuumguss machen und alle möglichen unglaublichen Entwicklungen wie Lasergravur und 3D-Druck. Das Feld der Additiven Fertigung ist gerade explodiert. Mit den neuen Herstellungstechniken können Sie all diese Dinge tun! Nutzen Sie die Prinzipien der Natur! Es ist eine Revolution!

Was sind die Hürden und Herausforderungen, die es zu meistern gilt?

Die Herausforderung für alle großen Unternehmen besteht darin, kostengünstig und in großen Mengen zu produzieren. Sie können diese wunderbaren Dinge herstellen, aber sie sind sehr kostspielig. Sie brauchen also eine ganz neue Sicht auf die Fertigung auf Nanotechnologieebene. Und es ist ein Problem auf mehreren Ebenen. Wer auch immer die notwendigen automatisierten Fabrikprozesse erfindet, wird Innovationen in der Medizin und im Baubereich bis hin zur Architektur beschleunigen. Wir werden ermitteln müssen, wo sich die „Übergangsstellen“ befinden, wo das Kaufinteresse ausreicht, um die Innovationen wirksam einsetzen zu können, und wo dann ein ganz neuer Markt entstehen kann. Allerdings ist es schwierig, diese „Übergangsstellen“ zu finden, aber wahrscheinlich liegen einige im medizinischen Bereich, weil viele Menschen, Regierungen und Versicherungsunternehmen bereit sind, zunächst mehr für medizinische Produkte zu bezahlen. Wenn Sie eine breite Anwendung dieser bioinspirierten Materialien für den Endverbraucher finden, die es Ihnen ermöglicht, die Kapazitäten optimal zu nutzen, dann wird das Ganze durch die Decke gehen.

Nicht zu vernachlässigen ist zudem das Thema Bildung: Wir müssen das zukünftige Potenzial von bioinspiriertem Design durch starke Bildungsprogramme realisieren. Kurse, die entdeckungsbasierte Ansätze mit designbasiertem Lernen verbinden, sind die Zukunft. Ich habe 200 Studierende in meinem Kurs, die

Hälfte davon studiert nicht Naturwissenschaften oder hat gerade erst angefangen zu studieren und hat also nie zuvor einen naturwissenschaftlichen Kurs besucht. Aber wir lassen sie wissenschaftliche Publikationen lesen, damit sie verstehen, wo die biologischen Entdeckungen herkommen. Sobald sie die Prinzipien verstanden haben, machen sie Entwürfe daraus. Zum Beispiel reichen wir gerade einen Antrag zusammen mit Thomas Speck²¹¹ ein. Und das Ziel ist es, in jedem College eine Version eines Kurses wie unseren zu haben. Wir wollen Kompetenzen auch für die spätere Arbeitswelt vermitteln, die Kreativität, Zusammenarbeit und Kommunikationsfähigkeiten beinhalten. Jedes Land wird diese Qualifikationen benötigen, denn in den meisten Fällen existieren die zukünftigen Jobs für die Studierenden von heute noch gar nicht. Wenn nicht sofort und schnell in dieses Feld investiert wird, ist es zu spät! Mit Peter Fratzl als Vorreiter liegt Deutschland jedoch in vielerlei Hinsicht weit vorne.

Spielt da auch die Kommunikation mit der Gesellschaft eine Rolle?

Ja, und ich bin da sehr optimistisch. Ich halte zum Beispiel viele TED-Vorträge. Diese Vorträge regen die Vorstellungskraft der Öffentlichkeit an und zeigen die gesellschaftlichen Vorteile des Lernens aus der Natur auf. Aber es besteht auch die Gefahr, dass einige Leute zu sehr auf die „grüne“ Natur drängen. Wir sollten die grundlegenden Prinzipien der Nachhaltigkeit wirklich verstehen und kommunizieren, damit wir nicht vom sogenannten Green Washing abgelenkt werden, bei dem zum Beispiel Unternehmen die Öffentlichkeit für ein Produkt begeistern, obwohl es die Umwelt nicht wirklich verbessert. Wir sind wirklich besorgt über solch unbegründete Behauptungen.

Wie beurteilen Sie das entsprechende Innovationspotenzial für die USA, oder ist die Innovation schon angekommen?

Wir sind noch ganz am Anfang, aber der biomedizinische Bereich wird der erste sein, in dem es losgeht, etwa bei der Medikamentenabgabe, der Zahnheilkunde und der Gesundheitsüberwachung. Aber auch der Verbrauchermarkt für Wearables ist groß. Bolt Threads²¹² zum Beispiel arbeitet mit Spinnenseide, die starten bei den Genen und kommen am Ende zu einem Produkt. Auch von der Natur inspirierte Klebstoffe, Schutzbeschichtungen, selbstheilende Materialien und antimikrobielle Mittel sind im Kommen. Und schließlich erobert die weiche Robotik (siehe Kapitel 5) das Land; weiche Materialien in Bezug auf Robotik sind an jeder Universität zu finden, besonders an unserer, in Harvard und am MIT.

211 | Prof. Thomas Speck ist Leiter der Plant Biomechanics Group und Direktor des Botanischen Gartens der Universität Freiburg. Siehe seinen Artikel zum Leichtbau (Kapitel 4).

212 | Vgl. Bolt Threads 2019.

Was würden Sie deutschen Entscheidungsträgern empfehlen?

Für ein starkes Unternehmertum – für ein Silicon Valley in Ihrem Land – müssen Sie eine pädagogische Basis haben, Studierende ausbilden und sie in Innovationsinkubatoren bringen! Aber die Politik muss das unterstützen – zusammen mit der Wirtschaft und mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus verschiedenen Bereichen, die ausgehend von den Molekülen bis hin zur ganzen Struktur forschen. Sie brauchen die Grundlagenforschung und müssen dann den Übergang zur Marktreife erleichtern, um den Verlust neuartiger Innovationen zu vermeiden, die nicht sofort Rendite bringen. Eigentlich ist es einfach für die Politik: Es ist eine Win-win-Situation, die Menschen werden mehr Arbeitsplätze und mehr Geld haben und mehr zu einer nachhaltigen Gesellschaft beitragen.



Abbildung 54: Der vom Gecko inspirierte Roboter namens „Stickybot“ klettert neben dem „biologischen Original“, dem Tokeh-Gecko, der einen feinfaserigen Klebstoff verwendet (Quelle: Robert J. Full, UC Berkeley).

12.3 Interview Lei Jiang, Beihang University, China²¹³

Prof. Dr. Lei Jiang ist Dekan der School of Chemistry der Beihang University und Experte in bioinspirierten intelligenten Grenzflächen. Er ist seit 2009 Mitglied der Chinesischen Akademie der Wissenschaften und seit 2012 Mitglied der „World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries“ sowie ausländisches Mitglied der American Academy of Engineering.

Prof. Jiang, welche Bedeutung hat die bioinspirierte Materialforschung für China?

Die Bedeutung ist hoch. In China arbeiten viele Forschungsgruppen auf diesem Gebiet, und die Regierung investiert in ein neues, von mir geleitetes Forschungszentrum „Bioinspirierte Grenzflächenwissenschaft und Zukunftstechnologie“.

Gibt es auch entsprechende Industrie, und sehen Sie Innovationspotenzial?

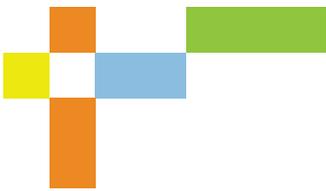
Es gibt bereits einige Unternehmen, und einige fangen gerade an. Das wird in nächster Zukunft sehr schnell wachsen. Zum Beispiel ist das neueste unbemannte Luftfahrzeug, das von Boeing entwickelt wurde, bioinspiriert, und zwar von einem Stachelrochen und nicht wie gewöhnlich von Vögeln.

Was sind die aktuellen Forschungsschwerpunkte in Ihrem Institut und in China?

Ich konzentriere mich auf die Superbenetzbarkeit, zum Beispiel auf die Frage, warum Lotusblätter so sauber sind. Sie sind superhydrophob, ein Tropfen rollt auf der Oberfläche wie eine Kugel. Wie funktioniert das? Oder warum ist unser Auge superhydrophil? Das sorgt dafür, dass unser Auge klar ist. Oder wie sammelt Spinnenseide Wasser aus einem Nebel? Warum kann ein Kaktus Wasser aus dem Nebel sammeln? Dies sind die Fragen, die wir beantworten möchten.

Sehen Sie solche Innovationen in den nächsten Jahren auf dem Markt?

Aber sicher! Die Leute produzieren schon heute künstliche Spinnenseide (siehe Kapitel 2.6)! Oder es gibt Projekte, bei denen morgens und abends am Strand Wasser gesammelt wird,



welches dann mithilfe von Schläuchen genutzt wird, um Pflanzen zu wässern. Oder Sie können auf einer Insel Strom erzeugen, indem Sie Süßwasser sammeln und mit Salzwasser mischen.

Planen Sie in Ihrem zukünftigen Institut eine Zusammenarbeit mit der Industrie, oder handelt es sich um ein reines Grundlagenforschungsinstitut?

Beides. Wir wollen intensiv forschen und dann den Transfer in die Industrie machen. Aber in China müssen wir uns nicht an die Industrie wenden, die kommt zu uns. Wir planen, gemeinsame Projekte zu starten, die von der Regierung und den kollaborierenden Unternehmen finanziert werden. In China verbinden wir Sozialismus und Kapitalismus – beide Gesellschaftsformen haben Vorteile.

Was sind Ihrer Meinung nach die größten Herausforderungen und Hürden für die Entwicklung dieser Art von Technologie?

Das Problem ist die mangelnde Kommunikation mit der Industrie: Wenn ein Wissenschaftler beziehungsweise eine Wissenschaftlerin ein Projekt anfängt, sollte die Industrie von Anfang an einbezogen werden, damit es anwendungsorientiert wird.

Glauben Sie, die chinesische Regierung hat erkannt, dass dieser Bereich wichtig ist?

Meine Arbeit ist die führende Forschung in China, und andere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler folgen. Indem Sie von der Natur lernen, können Sie heutzutage Forschungsförderung erhalten, und wir lernen aus den USA, Deutschland und Japan. Von der Natur lernen ist eine endlose Aufgabe, wir machen „Naturwissenschaften“ – das heißt doch genau, von der Natur zu lernen. Man kann keinen Kristall erfinden, ohne ihn von der Natur zu lernen. Und so wird es immer sein, nicht für China oder Deutschland, für die ganze Welt. Es ist sehr wichtig, das zu verstehen.

Wie beurteilen Sie Deutschland in diesem Zusammenhang?

Ich denke, Deutschland ist sehr stark, aber Innovation und der Transfer in die Industrie müssen schrittweise erfolgen.

12.4 Interview Xiaodong Chen, Nanyang Technological University, Singapur²¹⁴

Prof. Dr. Xiaodong Chen ist Präsident des Lehrstuhls für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik an der Nanyang Technological University (NTU) in Singapur und Direktor des Innovationszentrums für flexible Bauelemente (iFLEX) sowie Co-Direktor des Max Planck – NTU Joint Lab on Artificial Senses.

Prof. Chen, was sind die Forschungsschwerpunkte in dem Gebiet der bioinspirierten Materialwissenschaften in Singapur?

Singapur ist ein sehr kleines Land, aber wirklich innovationsorientiert. Wir haben keine extensiven Ressourcen, also versuchen wir sicherzustellen, dass unsere Forschung wirklich einen Einfluss auf unsere Gesellschaft hat, damit die Steuerzahler den Nutzen sehen. In diesem Bereich sehe ich einen großen Einfluss, und viele Menschen sind daran interessiert, zum Beispiel solche hydrophoben Materialien nachzuahmen. Eine andere Frage ist, was sind nachhaltige natürliche Ressourcen? Das Thema CO₂-Emission ist momentan natürlich auch sehr präsent.

Was sind die großen Herausforderungen?

Wir brauchen mehr Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wie Peter Fratzl, die sich darauf konzentrieren, wie man von der Natur lernen kann. Aber es gibt so viele verschiedene Forschungsrichtungen und Themen. Sie müssen sich auf die vielversprechenden Bereiche konzentrieren, und ein paar Vorzeigeprojekte haben! Sie müssen einen Business Case für einen erfolgreichen Modellfall haben, und dann werden weitere Forscherinnen und Forscher und die Industrie automatisch folgen. Insgesamt ist das Gebiet sehr aussichtsreich und bietet potenziell ein Szenario geringer Investitionen und großer Ergebnisse. Auch aus globaler Sicht: Es ist Zeit, nachhaltige Ressourcen zu nutzen! Wenn wir einen Weg finden, die Natur nachzuahmen, lösen wir dieses Problem.

214 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.



Abbildung 55: Direkt auf der Haut anzubringende Elektroden auf Seidenbasis mit hoher Hautanpassungsfähigkeit und hoher Leitfähigkeit, entwickelt von Prof. Chen und seiner Forschungsgruppe (Quelle: School of Materials Science and Engineering, Nanyang Technological University)

12.5 Interview Olli Ikkala, Aalto University, Finnland²¹⁵

Prof. Dr. Olli Ikkala leitet das Labor für Molekulare Materialien am Institut für Angewandte Physik der Aalto-Universität im Großraum Helsinki und das Kompetenzzentrum für Molekulare Verfahrenstechnik der Biosynthetischen Hybridmaterialforschung (HYBER) der Akademie von Finnland. Er entwickelt funktionelle Materialien, die auf hierarchischem Self-Assembly, Biomimetik und natürlichen Materialien wie Nanozellulose basieren.

Prof. Ikkala, welche Bedeutung haben biologisierte Materialwissenschaften für Skandinavien, und wie schätzen Sie deren Innovationspotenzial ein?

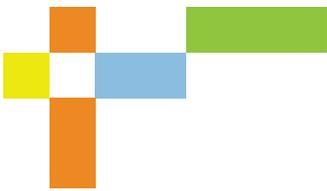
Es gibt zwei relevante Bereiche: erstens die Verwendung pflanzlicher Materialien (Zellulose, Hemizellulosen und Lignine) für konzeptionell neue Anwendungen und zweitens das sich abzeichnende Potenzial der Biotechnologie (synthetische Biologie) für die Materialwissenschaften.

In Bezug auf das erste Thema ist Finnland (wie Schweden) aus historischen Gründen in der Forstwirtschaft sehr aktiv. Es besteht ein großer Druck für die Branche, ihr Produktportfolio von

klassischen Papierprodukten und Pappen hin zu fortschrittlichen Holzwerkstoffen zu erneuern. Die Idee ist, in Zukunft mehr und mehr ölbasierte Polymere in verschiedensten Anwendungen durch nachhaltigere, auf Holz basierende Ausgangsmaterialien zu ersetzen. Früher oder später werden wir die Verarbeitung ölbasierter Polymere einschränken müssen. Der Grund dafür ist, dass wir immer höhere Kosten bei der Ausbeutung von Ölquellen in Kauf nehmen müssen, um die kontinuierliche Versorgung mit Öl zu gewährleisten. Es gibt andere Bereiche, in denen Materialien auf Pflanzenbasis die Lösung sein könnten, zum Beispiel für das Mikroplastikproblem oder die Tatsache, dass der Transport immer mehr elektrifiziert wird. Daher wird versucht, forstbasierte Ressourcen sowohl für Massenpolymeranwendungen als auch für neue, fortschrittliche Materialien zu nutzen. Dies ist sicherlich nicht einfach, da die traditionellen Polymere über mehrere Jahrzehnte entwickelt und optimiert wurden und ihre Rückführung potenziell Nachhaltigkeit ermöglicht – obwohl dafür eine gut definierte Infrastruktur erforderlich wäre, die es so noch nicht gibt in den gegenwärtigen Gesellschaften. Andererseits gibt es in der finnischen Politik eine weitere hektische Diskussion darüber, die CO₂-Emissionen zu senken und wie man CO₂-Senken, also Reservoirs, die in der Lage sind, Kohlenstoff aufzunehmen und zu speichern, bereitstellen und wiederherstellen kann. Das bringt die alternative politische Meinung mit sich, dass die Nutzung der forstbasierten Materialien nicht verstärkt werden sollte. Es gibt also zwei völlig entgegengesetzte Ansichten. Um rationale Lösungen zu erzielen, benötigen wir detaillierte und objektive Life-Cycle-Analysen für verschiedene Szenarien anstelle von gefühlsgesteuerten Ansichten. In unserem großen Vorzeigeprojekt FinnCERES – dem Kompetenzzentrum für Material-Bioökonomie – investiert die finnische Akademie in die Untersuchung verschiedener Szenarien und die Entwicklung relevanter technischer Lösungen in Zusammenarbeit mit bereits etablierten und aufstrebenden Unternehmen. Das ist eine große Herausforderung. Wir sehen, dass die Unternehmen zu investieren beginnen, um die Möglichkeiten für fortschrittliche, nicht ölbasierte, nachhaltige Materialien zu prüfen.

Auf der anderen Seite halten wir die synthetische Biologie für die Materialwissenschaft langfristig für sehr vielversprechend, allerdings besteht da konkreter Handlungsbedarf, um neue Technologien im größeren Maßstab zu ermöglichen. In Finnland forschen mehrere Universitäten im Bereich Biotechnologie, wobei insbesondere das VTT Technical Research Center of Finland im Zusammenhang mit der industriellen Biotechnologie in größerem Maßstab zu nennen ist. Sie haben bereits kommerzialisierte Verfahren für die globale Industrie entwickelt, zum Beispiel für abbaubare Polymere.

215 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.



Wie binden Sie die Industrie früh ein?

Dies ist eine Schlüsselfrage. Unsere bisherige Erfahrung zeigt, dass noch eine starke forschungsorientierte Wettbewerbsfinanzierung erforderlich ist, bevor die Unternehmen umfassend in die eigentliche produktorientierte Forschung und Entwicklung investieren. In unserem FinnCERES-Projekt geht es darum, die Umwandlung pflanzlicher Materialien in kommerzielle Innovationen und Produkte zu unterstützen („translationale“ Forschung). Wir forschen in verschiedenen Bereichen, wie Zusammensetzung von Lebensmitteln, Baumaterialien, Photonik, saubere Luft und sauberes Wasser, leichte Materialien, Wearables,²¹⁶ Carbonmaterialien, Beschichtungen, Klebstoffe, Energie etc. Wichtig ist, dass jetzt eine breite Gruppe von Unternehmen beteiligt ist, nicht nur die Zelluloseindustrie. FinnCERES nutzt die Fördermittel als Startkapital, um die Unternehmen zunehmend zur gemeinsamen Entwicklung von Innovationen zu bewegen. Insbesondere gibt es vielversprechende Startups in eher kleinen Marktnischen.

Was sind dann die größten Hürden und Herausforderungen?

Die sind so ziemlich die gleichen wie in jedem Bereich, in dem neue Produkte auf den Markt gebracht werden: Der Preis muss niedriger oder zumindest gleich sein, und die Eigenschaften müssen besser sein als die der etablierten Produkte. Bei pflanzlichen Materialien besteht ein möglicher Weg darin, Industrieabfälle zu verwenden, um die Kosten zu senken. In Finnland hat dies neue Geschäftsmöglichkeiten eröffnet, insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen.

Eine weitere potenzielle Hürde sind die unterschiedlichen Kunden aus der Materialindustrie und der Forstindustrie, die unterschiedliche Anforderungen und Hintergründe haben. Wie kann man diese Unterschiede überbrücken? Außerdem stellt die Forstindustrie in der Regel Produkte in großen Volumina her, während der Markteintritt in die fortgeschrittene Materialwissenschaft möglicherweise anfangs einen Fokus auf kleinvolumige Spezialprodukte erfordert. In einigen Fällen hat die Forstindustrie bereits spezialisierte Produkte auf den Markt gebracht, zum Beispiel gibt es UPM Biomedicals, die Lösungen für biomedizinische Anwendungen auf Holzbasis vermarkten.

Was ist nötig, um voranzukommen?

Wir brauchen ausnahmslos multidisziplinäre Forschungsmethoden, um Branchenfachleute einer neuen Generation mit einer neuen Arbeitskultur und neuen Netzwerken heranzuziehen.

Dies erfordert eine nahtlose Zusammenarbeit zwischen Chemikerinnen, Physikern, Materialwissenschaftlerinnen, Biochemikern, Modellierungsexpertinnen und Ingenieuren. Diese Arbeitskultur wurde in unserem von der Akademie von Finnland geförderten Kompetenzzentrum für molekulare Verfahrenstechnik für hybride Biosynthesematerialien übernommen. Wir haben in den vergangenen sechs Jahren Physikerinnen, Biologen und Chemikerinnen zusammengebracht, gemeinsame Gruppenmeetings eingeführt und gelernt, die gleiche Sprache zu sprechen. Es ist auch interessant zu sehen, wie der IT-Bereich so signifikant geworden ist, unsere Kultur zu verändern: In den Anfängen gab es dort eine Hacking-Kultur, die Leute haben nur zum Spaß programmiert und alle möglichen Geräte gebaut. In Bezug auf die synthetische Biologie brauchen wir so eine Kultur des „Bio-Hacking“. Das ist der Grund, warum meine Kollegin Prof. Merja Penttilä gerade eine Million Euro Fördergelder für die Gründung eines „Bio-Hacking-Labors“ erhalten hat.

... um ein „Garage Lab“ wie in den Anfangszeiten von Microsoft zu haben?

Ganz genau, wir nennen es sogar Biogarage! Die Studierenden sind aufgefordert, ihre eigenen Entdeckungen zu machen. Wir denken, dass dies wirklich wichtig ist, obwohl wir hier eindeutig weit von Innovationen entfernt sind. Aber es verändert die Kultur.

Wie schätzen Sie die Entwicklungen in den nächsten Jahren ein?

Es ist wichtig, die Materialbasis in der Polymerindustrie gründlich zu überdenken. Ein interessanter Punkt ist natürlich die Nachhaltigkeit und die unterschiedlichen Ansichten dazu. Nachhaltigkeit kann durch die Verwendung von Kunststoffen auf Ölbasis in einer effizienten Umlaufinfrastruktur erreicht werden. Es wird jedoch immer Länder geben, in denen die Rückführung nicht funktioniert. Die auf Öl basierende Wirtschaft gründet sich auf äußerst optimierten Prozessen, bei denen jedes Teilprodukt verwertet wird. Dies geschieht jetzt im pflanzenbasierten Bereich auch: Es wird als Bio-Refining bezeichnet – und wir können immer mehr die aus Öl gewonnenen Chemikalien ersetzen. Es mag nicht in allen Fällen wettbewerbsfähig sein, aber es gibt einen Trend, dass es billiger wird, während Öl auf lange Sicht teurer wird. Es wird also früher oder später den Punkt geben, an dem sich das umkehrt.

Außerdem können bioinspirierte Materialien komplex sein, wobei sie aber Multifunktionalität ermöglichen. Daher glauben wir, dass wir das maschinelle Lernen und die Künstliche Intelligenz stärker einbeziehen müssen, um bioinspirierte

216 | Tragbare Computersysteme, wie zum Beispiel Smartwatches.

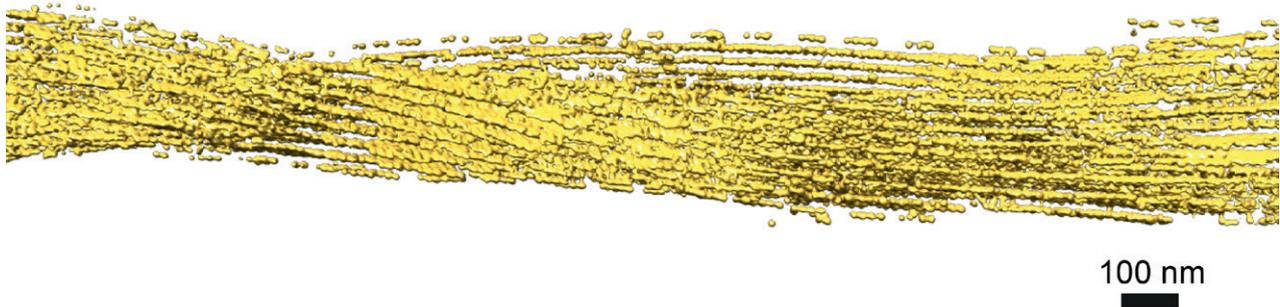


Abbildung 56: Elektronenmikroskopisches Tomogramm von Goldnanopartikeln aufgebracht auf eine selbstassemblierte Tabakmosaikvirusstruktur, exemplarisch für biomimetisches Templating zur Erlangung neuartiger Funktionen (Quelle: Dr. Nonappa, Aalto University, School of Science, Finnland)

Materialien richtig zu designen. Wir müssen einen großen Parameterraum untersuchen, in dem eine Art Big-Data-Verarbeitung Vorteile bringen könnte. Eine Herausforderung ist die Generierung geeigneter Datenbibliotheken. Bisher funktioniert maschinelles Lernen nur in sehr einfachen Fällen. Daher sind konzeptionelle Entwicklungen unabdingbar. Eine weitere potenziell attraktive Entwicklung wäre die „gerichtete Evolution“ für die Materialwissenschaft. Mithilfe von Bioinspiration werden immer komplexere Funktionalitäten nachgeahmt, insbesondere auch dissipative Nicht-Gleichgewichtssysteme. Mein persönliches Interesse gilt der Frage, wie man über responsive und Formgedächtnismaterialien hinausgehen kann bis hin zu Materialien, die „lernende“ Elemente integrieren, wie zum Beispiel die algorithmische Nachahmung von klassischer Konditionierung, was zu den einfachsten Formen des psychologischen Lernens zählt. Diese Ansätze sind vielversprechend, unser erster Artikel aus unserem zweiten ERC Grant wurde gerade dazu veröffentlicht. Allgemein wird einer der nächsten Schritte in der Bioinspiration sein, nicht nur „tote“ Materialien wie Seide, Knochen, Zähne oder Perlmutter nachzuahmen, sondern auch dynamische Nicht-Gleichgewichtsmaterialien, die mehr und mehr lebensähnliche Verhaltensweisen an den Tag legen.

Gibt es sonst noch etwas, was wir zu dem Thema besprechen sollten?

Um ein konkretes Beispiel zu nennen: In Finnland besteht ein großes Interesse daran, Baumwolle zu ersetzen. Auch wenn Sie vielleicht denken, dass Baumwolle nachhaltig ist, braucht sie viel Wasser, das immer mehr zu einer begrenzten Ressource wird. Es

hat eine lange Tradition, Baumwolle aus Zellulose durch beispielsweise Viskose zu ersetzen, aber häufig werden toxische Lösungsmittel verwendet. Selbst wenn man anfänglich biobasierte Materialien verwendet, ist der Prozess nicht nachhaltig. Darin können ionische flüssige Lösemittel neue Wege eröffnen – ein gutes Beispiel ist das Projekt Ioncell, das den gesamten Weg „from Birch to the Fashion Catwalk“ vorsieht. Es ist noch in der Pilotphase, aber vielversprechend und könnte in den nächsten Jahren auf den Markt kommen.

12.6 Interview João Mano, Universität Aveiro, Portugal²¹⁷

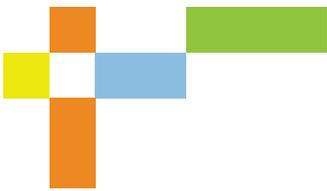
Prof. Dr. João F. Mano ist ordentlicher Professor an der Fakultät für Chemie der Universität von Aveiro in Portugal, Direktor des Master- und Doktorprogramms in Biotechnologie an der Universität von Aveiro und gehört dem assoziierten Labor CICECO – Aveiro Institute of Materials an, wo er Direktor der COMPASS-Forschungsgruppe ist.²¹⁸

Prof. Mano, welche Bedeutung haben die Biologisierung in den Materialwissenschaften und ihr Innovationspotenzial für Portugal?

Das Thema ist im Allgemeinen sehr wichtig – nicht nur für mein Land, sondern auch für Europa und die Welt, insbesondere weil die Idee der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung dabei eine Rolle spielt. Darüber hinaus basiert die Biologisierung auf hochinnovativen Lösungen, die im Vergleich zu derzeit verwendeten Technologien wirtschaftlich attraktiver sein können.

217 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.

218 | Vgl. COMPASS 2019.



Was sind in diesem Kontext die relevanten Forschungseinrichtungen in Portugal, und was sind deren Forschungsgebiete?

An der Universität von Aveiro gibt es CICECO, die größte Forschungseinheit für Materialien in Portugal, mit fast 500 Forschenden. Das Interesse an Keramik ist groß, und wir arbeiten intensiv an bioinspirierten Biomaterialien, bei denen bioaktives Glas und Verbundwerkstoffe für biomedizinische Anwendungen verwendet werden. Wir sind auch im biobasierten Bereich stark, wir nutzen Ressourcen aus den Wäldern und aus dem Meer: Unsere Forschungsgruppe untersucht Zellulose und aus dem Meer stammende Polysaccharide sowie fortgeschrittene chemische Prozesse für ihre Modifikation. Basierend auf solchen Polymeren natürlichen Ursprungs können wir uns auch von der Natur inspirieren lassen, um neue Biomaterialien und Strategien für Tissue-Engineering-Anwendungen²¹⁹ zu entwickeln. Wir sind auch stark in anorganischen Materialien und metallorganischen Gerüsten.

Wie beurteilen Sie die Entwicklungen in Portugal in den nächsten Jahren an Ihrem Institut, aber auch allgemein? Gibt es eine biologisch inspirierte „Industrie“, und gibt es Produkte auf dem Markt?

Wir haben mehrere Branchen, in denen Materialien aus erneuerbaren Quellen, aus der Forstwirtschaft, dem Meer und der Landwirtschaft verwendet werden. In Bezug auf industrielle Anwendungen besteht ein großes Potenzial, da diese Technologien immer komplexer werden und höher qualifizierte Fachkräfte erfordern. In Portugal fehlt es uns jedoch immer noch an biomedizinischen Unternehmen und an einer großen Pharmaindustrie. Wir beobachten jedoch auch ein Wachstum auf diesem Gebiet und haben immer mehr Fachleute und Ausgründungen. Zum Beispiel haben wir ein Spin-off gegründet: Dort wollen wir von Menschen stammende Proteine kommerzialisieren, die in Hydrogele umgewandelt und zum Kultivieren von Zellen in 3D verwendet werden können – mit klarem Potenzial für Therapeutika und die gezielte Wirkstoffabgabe. Portugal startet außerdem ein neues Programm mit dem Titel „Collaborative Laboratories“, in dem sich Industrie, Technologietransferagenturen und Universitäten in großen Konsortien zusammenschließen, um wichtige gesellschaftliche Probleme wie zum Beispiel das der Energieressourcen zu lösen.²²⁰ Die Themen umfassen Lebensmittel, Baumaterialien, Transportmittel oder Bioraffinerien, und zusätzlich zu den staatlichen Mitteln sollen auch die beteiligten Unternehmen investieren. Dies ist derzeit das wichtigste Programm in Portugal, um Industrie

und Wissenschaft zusammenzubringen. Nach der Krise 2008 in Portugal ist unser Land nun auf einem guten Weg: In den letzten Jahren wurde mehr in die Wissenschaft investiert, insbesondere in wissenschaftliche Arbeitsplätze.

Sollte die Europäische Union eine Rolle bei dem Thema spielen?

Auf jeden Fall! Es bräuhete spezielle Calls²²¹ der Kommission, um die interdisziplinäre Forschung zu erleichtern. Es sollte ein Schwerpunkt auf in die Anwendung übertragbare Wissenschaften gelegt werden, beispielsweise auf biologisch inspirierte Klebstoffe. Aber die Studie, die Sie durchführen, scheint in die richtige Richtung zu gehen. Wenn wir zum Beispiel die europäischen Flagship-Programme²²² zu Graphen oder dem menschlichen Gehirn nehmen, wäre es interessant, solch ein großes Programm zur Biologisierung zu haben – oder wie Sie es nennen wollen.

12.7 Interview Sybrand van der Zwaag und Santiago Garcia Espallargas, TU Delft, Niederlande²²³

Prof. Dr. Sybrand van der Zwaag ist Professor für neuartige Materialien für die Luft- und Raumfahrt (NovAM) an der Technischen Universität Delft in den Niederlanden. Unter anderem ist er wissenschaftlicher Direktor am Delfter Zentrum für Werkstoffe und die treibende Kraft hinter dem Programm für innovationsorientierte Forschung (IOP) für selbstheilende Werkstoffe.

Prof. Dr. Santiago Garcia Espallargas ist derzeit außerordentlicher Professor in der Novel Aerospace Materials Group und Teamleiter für die Erforschung selbstheilender polymerer Materialien an der Technischen Universität Delft.

Prof. van der Zwaag, was sind die aktuellen Forschungsschwerpunkte in Ihrem Land in diesem Gebiet?

Wir befinden uns mitten im Übergang vom Flugzeug mit starren Tragflächen – starr aufgrund des starren Aluminiums, aus dem sie bestehen – hin zu wandelbaren Tragflächenstrukturen. Ein

219 | Beispiele sind Gewebekonstruktion und -züchtung.

220 | Vgl. Fundacao para a Ciencia e a Tecnologia 2019.

221 | Aufforderung zur Einreichung von Projektanträgen.

222 | Vgl. European Commission 2019.

223 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.

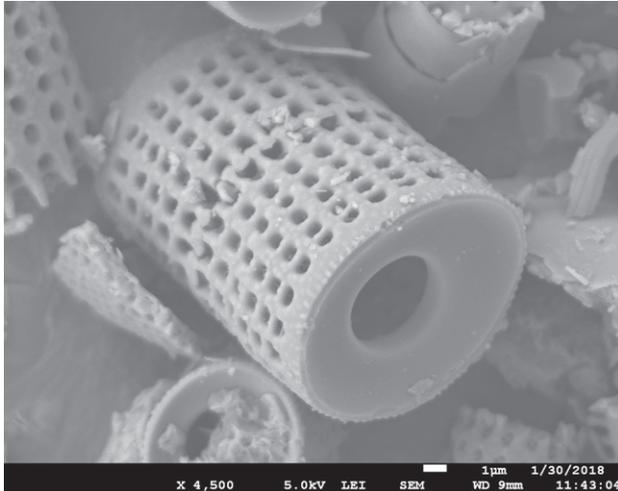


Abbildung 57: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der porösen äußeren Gerüste von Kieselalgen, die zur Einlagerung der Korrosionshemmer verwendet werden (Quelle: Paul J. Denissen, Novel Aerospace Materials group, Delft University of Technology)

Vogel fliegt aufgrund der wandelbaren Form der Flügel – das ist die große Herausforderung für die technische Nachahmung. Die Idee ist, dass wandelbare Tragflächen die Effizienz verbessern. In Bezug auf bioinspirierte Materialien haben wir zwei Entwicklungen: eine ist das Programm für selbstheilende Materialien, das 2003 gestartet wurde und an dem 85 Unternehmen und 5 Universitäten beteiligt sind. Die niederländische Regierung hat sich mit dreißig Millionen Euro und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit einem Matching-Programm beteiligt. Als zweite Entwicklung etabliert Dr. Garcia gerade ein kleineres, aber individualisiertes Programm zur Verwendung biologischer Substanzen in Flugzeugbeschichtungen.

Prof. Garcia, was ist Ihre Rolle in den genannten Programmen?

Über ein Jahrzehnt lang haben wir uns darauf konzentriert, zu lernen, wie man die Polymerchemie modifiziert, um starke, aber heilbare Polymere herzustellen, und wie man diese Heilung in Polymeren und Beschichtungen richtig charakterisiert. Wir werden weiter an diesen Themen arbeiten, aber auch an anwendungsorientierteren Bereichen forschen. Parallel haben wir ein neues Programm gestartet, um Materialien aus Mikroorganismen herzustellen. Einige erfolgreiche erste Konzepte, an denen wir arbeiten, sind die Verwendung von Algen-Exoskeletten (siehe Abbildung 57) für Korrosionsschutzanstriche und die

Entwicklung von bakterienbasierten perlmuttartigen Beschichtungen unter der Leitung von Dr. Meyer und Dr. Aubin. Die ersten Ergebnisse sehen sehr vielversprechend aus. Mithilfe der Industrie und anderer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erwarten wir, diese Programme in der näheren Zukunft weiter auszubauen.

Prof. van der Zwaag, arbeiten Sie mit Spin-offs oder größeren Firmen zusammen?

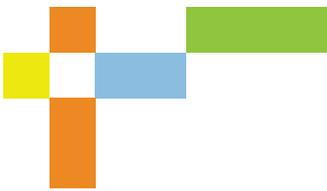
Wir ziehen es vor, mit größeren Firmen zu kooperieren, aber wenn diese zu langsam arbeiten, sehen wir uns nach Alternativen um. Zu diesem Zweck haben wir zwei Unternehmen gegründet, „Slimy Green Stuff“²²⁴ und „Green Basilisk“ (siehe Kapitel 9.4), die Biomaterialien entwickeln und vermarkten. Beide nutzen Bioinspiration, um neue Materialien mit guten Funktionalitäten zu kreieren. Die Materialien beider Unternehmen werden im Bauwesen angewendet, obwohl die Bauindustrie den Ruf hat, sehr konservativ zu sein. Ist die Innovation erst einmal akzeptiert, können die Auswirkungen riesig sein. Zur Überzeugung der Industrie ist ein erfolgreiches Upscaling von Gramm-Skalen im Labor zur Herstellung im Tonnenbereich notwendig. Das hat sich bisher als größte Hürde erwiesen.

Prof. van der Zwaag, ist es sinnvoll, traditionelle Systeme komplett aufzugeben, oder wollen Sie diese in Teilen ersetzen und intelligent kombinieren?

Wir sollten jetzt nicht versuchen, alles Traditionelle zu ersetzen, vielleicht in Zukunft, wer weiß? Wir sollten uns aber ansehen, was der tatsächliche Wert solcher Systeme ist.

Prof. Garcia, wie sehen Sie das?

Wir müssen realistisch sein: Einige künstliche Materialsysteme übertreffen biologische Materialien um Größenordnungen. Betrachtet man Metalle in Bezug auf Festigkeit, Steifigkeit und Formbarkeit, gibt es einfach kein vergleichbares biologisches System, das mithalten kann. Auch Beton kann nicht ersetzt werden und Hochleistungsfasern wahrscheinlich auch nicht – obwohl die Spinnenseide (siehe Kapitel 2.6) ein schönes Beispiel ist. Kohlenstofffasern sind extrem steif und übertreffen biologische Systeme bei Weitem. Biologische Materialien sind möglicherweise nicht in der Lage, synthetisch hergestellte Materialien vollständig zu ersetzen, sie können jedoch neue und verbesserte Materialeigenschaften ermöglichen, die ansonsten mit synthetischen Materialien schwer zu erreichen sind. Das



haben wir in einem kürzlich erschienenen Bericht als „Bio-Touch“ bezeichnet.²²⁵ Aber auch andere Felder, wie beispielsweise die Informatik, werden sicherlich von biologischen Konzepten wie neuronalen Netzen und sogar Selbstheilung profitieren. Es gibt zudem Materialien für die Datenverarbeitung und für funktionale Eigenschaften im Energiebereich. Die Erzeugung von Sauerstoff und Wasserstoff ist etwas, bei dem biologisch inspirierte und biobasierte Materialien möglicherweise ein Wörtchen mitzureden haben werden.

Und wie beurteilen Sie die Entwicklungen in den Niederlanden in den nächsten Jahren, einerseits in der Wissenschaft, andererseits aber auch in Richtung Innovation, Prof. van der Zwaag?

Bei den selbstheilenden Materialien wird der Übergang von einem guten Konzept zu etwas industriell Realem immer schwieriger, da die Rahmenbedingungen dafür nur in wenigen Spezialgebieten existieren. Wir müssen die Politik dazu bringen, Folgendes zu realisieren: Die universitäre Forschung könnte neue Arbeitsplätze schaffen und den bestehenden Firmen zugutekommen. Wenn wir aber einen Wandel herbeiführen wollen, müssen wir wieder auf eine tiefere Ebene der Grundlagenforschung wechseln, der Forschung mehr Zeit einräumen und sicherstellen, dass der Übergang abgedeckt wird. Wir müssen jetzt nicht alle „back to the roots“ gehen, aber es sollte auch gesonderte Programme geben – neben dem gegenwärtigen Trend, die Industrie von Anfang an in die Konzeptentwicklung einzubinden. Unser nationales Programm für selbstheilende Materialien wurde finanziert, weil die niederländische Materialbranche sehr deutlich darauf hingewiesen hat, dass unser Konzept wirklich interessant und förderungswürdig, aber zu weit von ihrem derzeitigen Interesse entfernt ist, um finanzielle Unterstützung aus der Industrie zu erhalten.

Was sind dann die größten Herausforderungen für die Umsetzung und Innovation, Prof. Garcia?

Das Upscaling ist in vielen Fällen eine große Herausforderung: Die Frage ist, wie man die vorhandenen Ideen hochskaliert. Die meisten dieser Entwicklungen im Labor bleiben im Milligramm-Bereich.

Und wo sehen Sie Potenzial der bioinspirierten Materialien, Prof. van der Zwaag?

Für die Niederlande sind Milchprodukte als Ressource sehr wichtig, und da haben wir viel Fachwissen. Der zweite große Zweig ist wasserbezogen. Wenn Sie sich die Niederlande und

insbesondere die TU Delft im Biotechnologie-Bereich ansehen, sind wir Weltmeister in der Reinigung von Wasser durch das Entfernen schädlicher und anderer unerwünschter Substanzen. Diese Tradition, die richtigen Moleküle aus biologischen und nicht-menschengemachten Substanzen zu extrahieren, dieses Fachwissen ist hier sehr präsent, und da sehe ich großes Potenzial für die Niederlande.

12.8 Interview Hisashi Yamamoto, Chubu University, Japan²²⁶

Prof. Dr. Hisashi Yamamoto ist organischer Chemiker, Mitglied der Fakultät der Universität Chicago und Universitätsprofessor an der Nagoya University sowie Professor und Direktor an der Chubu University in Japan. Seine Forschungsarbeit befasst sich hauptsächlich mit Säurekatalyse-Chemie.

Prof. Yamamoto, welche Bedeutung haben bioinspirierte Materialien, und wie schätzen Sie deren Innovationspotenzial ein?

Bioinspirierte Materialien haben eine unglaubliche Bedeutung, daher arbeite ich mittlerweile in der Peptidchemie. Peptide sind ein wichtiges und nachhaltiges Naturprodukt für die Arzneimittelindustrie. In diesem Jahrhundert sind immer mehr Leute an der Entwicklung neuer Hochleistungsbiomaterialien interessiert, zum Beispiel an künstlicher Spinnenseide – diese ist sehr stark und reißfest. Lange haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ohne Erfolg versucht, die Spinnenseide zu synthetisieren, aber dann kam der Durchbruch: Mittlerweile konnte die Sequenz von Spinnenseide-Proteinen entschlüsselt werden, und ein kleines Unternehmen in Japan stellt die Seide mithilfe von Bakterien her.

Was sind denn die großen Hürden und Herausforderungen in dem Gebiet?

Wir haben noch Schwierigkeiten bei der Peptidsynthese. Fast jede Woche werden neu entdeckte Peptide in biologischen Fachzeitschriften veröffentlicht, aber leider ist die Synthese dieser Peptide in größerem Maßstab extrem teuer und kompliziert. Das stellt einen Engpass für die Pharmaindustrie dar. Die Synthesechemie interessiert sich auch nicht mehr so sehr für die Peptidsynthese, weil alle glauben, dass sie bereits seit einem halben Jahrhundert etabliert ist. Dabei haben wir noch keine moderne Synthesetechnologie für Peptide. Mein Ziel ist es, den Preis für

225 | Vgl. Montano et al. 2018.

226 | Das Interview wurde im Original auf Englisch geführt.

Peptide um ein Tausendstel oder noch mehr zu senken. Wenn ich erfolgreich bin, werden die Peptide im kommenden Jahrhundert in den Fokus von Pharmaunternehmen rücken.

Aber auch das Upscaling der Peptidsynthese ist immer noch eine Herausforderung. Der Übergang von Mengen im Milligramm- zum

Kilobereich wird die Welt der Arzneimittel revolutionieren. Wir müssen wegweisende und grundlegende Änderungen vornehmen, denn diese neuen Technologien, die von der Natur inspiriert sind, werden sich grundlegend von den bisherigen unterscheiden. Dies gilt nicht nur für die Chemie, das kann auch in der Biologie oder der Physik passieren.



Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Materialien VON, FÜR und DURCH die Natur.....	14
Abbildung 2: Treiber und interdisziplinäre Verknüpfungen für die Entwicklung komplexer molekularer Materialien.....	20
Abbildung 3: Vorgeschlagener Paradigmenwechsel zur Herstellung biologisch inspirierter, lebensähnlicher Materialien.	25
Abbildung 4: Exemplarische Darstellung verschiedener DNA-basierter molekularer Strukturen.....	27
Abbildung 5: Nicht-kanonische Aminosäuren verwandeln natürliche Proteinmaterialien in smarte Biomaterialien.	28
Abbildung 6: Perlmutter der Abalonia Schale und die konstituierende Nanostruktur im Rasterelektronenmikroskop.....	29
Abbildung 7: Mikromanipulator-Experiment mit mesokristallinem Zement.	30
Abbildung 8: Adidas Prototyp Hochleistungs-Performance Sportschuh aus Biosteel® Faser.....	31
Abbildung 9: Texturierte Silikonimplantate der Firma POLYTECH mit homogener Beschichtung aus Seidenprotein.....	31
Abbildung 10: Das Plazentabarrieremodell der Firma Cellbricks.	36
Abbildung 11: Zellulose-Komposite basierend auf der Synthese von Bioinspiration und Nutzung von Holz.....	39
Abbildung 12: BUGA Faserpavillon	40
Abbildung 13: Entwicklung der Prozesskette für ein PLA T-Shirt.....	42
Abbildung 14: PLANTOID-Roboter	45
Abbildung 15: Prototyp eines tintenfischähnlichen Roboterarms.....	47
Abbildung 16: Der von der Chamäleon­zunge inspirierte FlexShapeGripper	47
Abbildung 17: Reaktionsschema Photosystem	50
Abbildung 18: Teilprozesse der Künstlichen Photosynthese im Überblick.....	51
Abbildung 19: Integriertes System zur photoelektrochemischen Wasserspaltung	52
Abbildung 20: Transparente oberflächenstrukturierte Filme aus Zellulose.....	53
Abbildung 21: Früchte der Marmorbeere und photonische Mikropartikel aus Zellulose-Nanokristallen.....	54

Abbildung 22: Hafthaare eines Kartoffelkäfer-Männchens.....	58
Abbildung 23: Mikroskopische Aufnahme der biomimetischen Oberflächenstruktur des synthetischen Haftmaterials.....	58
Abbildung 24: Prinzipien biologischer Haftsysteme und ihre Beziehung zu spezifischen Funktionen.....	59
Abbildung 25: Bioinspirierte Haftstrukturen für automatisierte Handhabungsaufgaben.	60
Abbildung 26: Muschel und ihre Byssalfäden.	61
Abbildung 27: Natürliche Oberfläche des Schwimmpfarnes.....	62
Abbildung 28: Künstlich hergestelltes Polymer mit strukturierter, unter Wasser lufthaltender Oberfläche	62
Abbildung 29: Hydrophobin-Proteine	63
Abbildung 30: Ausrichtung von Mineralpartikeln im Knochen.....	68
Abbildung 31: Biomimetische Ansätze auf der Basis von Elektrospinn-Techniken	70
Abbildung 32: Blutbehandlung bei Sepsis mit an Materialoberflächen gekoppeltem Wirkstoff.....	71
Abbildung 33: Elektroden-Gewebeschnittstelle von Cochlea-Implantaten.....	72
Abbildung 34: Fertigung neuronaler Implantate.....	73
Abbildung 35: Webtechnisch hergestellte kardiovaskuläre Implantate.....	74
Abbildung 36: Modell eines Einzelelements für programmierbare Materialien.....	76
Abbildung 37: Einzelelemente programmierbarer Materialien.	76
Abbildung 38: Biointelligente Logistik als agiles Wertschöpfungs-Ökosystem	78
Abbildung 39: Zelluläres Transportsystem mit dezentraler Multi-Agenten-Steuerung.	78
Abbildung 40: Anordnung von Transistoren inspiriert durch ein biologisches neuronales Netzwerk.....	79
Abbildung 41: Würfel aus bioinspiriertem, selbstheilendem Zement	80
Abbildung 42: Aktivität als Verbindung von Materie, Energie und Information.	82
Abbildung 43: Reversible Entfaltung der Samenkapseln der Prächtigen Fetthenne	85
Abbildung 44: Hierarchische Systeme in Material und Klang.....	88
Abbildung 45: „Stone Web“, modulares Leichtbausystem aus gewickelter Basaltfaser	89

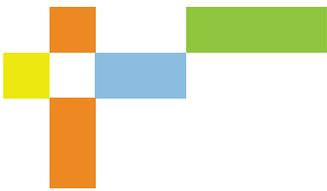


Abbildung 46: Sitzelemente aus „Stone Web“.....	89
Abbildung 47: Billy Bamboo führt durch das Bionik-Quiz.....	91
Abbildung 48: Bioinspirierte Materialien in ihrem sozio-technischen und ökologischen Umfeld.....	92
Abbildung 49: Biologisch inspirierte Materialwissenschaften: Veröffentlichungen pro Jahr	97
Abbildung 50: Zitationen von Veröffentlichungen nach Ländern	98
Abbildung 51: Zahl der eingereichten Patente pro Jahr	98
Abbildung 52: Anzahl eingereicherter Patente pro Jahr nach Patentagenturen.....	99
Abbildung 53: Organs-on-Chips	111
Abbildung 54: Der von Geckos inspirierte Roboter namens „Stickybot“	113
Abbildung 55: Elektroden auf Seidenbasis.....	115
Abbildung 56: Tomogramm von Goldnanopartikeln auf Tabakmosaikvirusstrukturen	117
Abbildung 57: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von Kieselalgen.....	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Förderprogramme der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG.....	101
--	-----

Literatur

acatech 2017

acatech: *Medizintechnik und Individualisierte Medizin* (acatech POSITION), München, 2017.

acatech et al. 2016

acatech/Leopoldina/Akademienunion: *Additive Fertigung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), Berlin, 2016.

acatech et al. 2018

acatech/Leopoldina/Akademienunion: *Künstliche Photosynthese. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), Berlin, 2018.

Antony et al. 2012

Antony, F./Mai, F./Speck, T./Speck, O.: „Bionik – Vorbild Natur als Versprechen für nachhaltige Technikentwicklung?“. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 65: 4, 2012, S. 175–182.

ASTM / ISO 2013

American Society for Testing and Materials / International Organization for Standardization: „Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies“: 52921-13, West Conshohocken, PA.

Bargel/Scheibel 2018

Bargel, H./Scheibel, T.: „Bioinspirierte Materialien: Aktuelle Trends in der Entwicklung“. In: *MNU Journal*, 71: 01, 2018, S. 4–10.

Bäumchen et al. 2015

Bäumchen, O./Hähnel, H./Loskill, P./Jacobs, K.: „Vom Photolack zum Gecko“. In: *Physik Journal*, 14: 1, 2015, S. 37–43.

Barthelat et al. 2016

Barthelat, F./Yin, Z./Buehler, M. J.: „Structure and Mechanics of Interfaces in Biological Materials“. In: *Nature Reviews Materials*, 1, 2016, S. 16007.

Beachley et al. 2015

Beachley, V. Z./Wolf, M. T./Sadler, K./Manda, S. S./Jacobs, H./Blatchley, M. R./Bader, J. S./Pandey, A./Pardoll, D./Elisseeff, J. H.: „Tissue Matrix Arrays for High-Throughput Screening and Systems Analysis of Cell Function“. In: *Nature Methods*, 12: 12, 2015, S. 1197.

BIONA 2019

BIONA – Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien: *Umsetzungsorientierte Verbundvorhaben*, 2019. URL: <http://www.bionische-innovationen.de/#verbundvorhaben.html> [Stand: 18.07.2019].

Bittner et al. 2013

Bittner, A. M./Alonso, J. M./Górzny, M. Ł./Wege, C.: „Nanoscale Science and Technology with Plant Viruses and Bacteriophages“. In: Mateu, M. G. (Hrsg.), *Structure and Physics of Viruses*: Springer 2013, S. 667–702.

Bolt Threads 2019

Bolt Threads: *Bolt Threads*, 2019. URL: <https://boltthreads.com/> [Stand: 19.09.2019].

Bonus BioGroup 2018

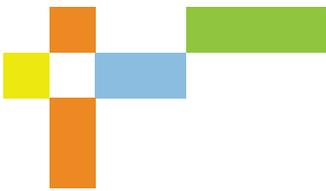
Bonus BioGroup: „For the first time ever, arm and leg were healed using a bone graft grown outside patient’s body, in an orthopedic clinical trial for filling extensive critical bone void in limbs (Pressemitteilung vom 11.03.2018). URL: <http://www.bonusbiogroup.com/index.php/news-media/press-releases/item/29-for-the-first-time-ever-arm-and-leg-were-healed-using-a-bone-graft-grown-outside-patient-s-body-in-an-orthopedic-clinical-trial-for-filling-extensive-critical-bone-void-in-limbs> [Stand: 19.09.2019].

Budisa/Schneider 2019

Budisa, N./Schneider, T.: „Expanding the DOPA Universe with Genetically Encoded, Mussel-Inspired Bioadhesives for Material Sciences and Medicine“. In: *ChemBioChem*, 20: 17, 2019, S. 2163.

Buehler 2013

Buehler, M. J.: „Materials by Design—A Perspective from Atoms to Structures“. In: *MRS Bulletin*, 38: 2, 2013, S. 169–176.



Bundesministerium für Bildung und Forschung 2006

Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Bekanntmachung der Förderrichtlinie BIONA – Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien (Pressemitteilung vom 20.10.2006). URL: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php?B=201> [Stand: 18.07.2019].

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Vom Material zur Innovation* (Rahmenprogramm), Bonn, 2015.

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2019

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *FONA – Forschung für Nachhaltige Entwicklung*, 2019. URL: www.fona.de [Stand: 19.09.2019].

Campbell/Wu 2018

Campbell, A./Wu, C.: „Chronically Implanted Intracranial Electrodes: Tissue Reaction and Electrical Changes“. In: *Micromachines*, 9: 9, 2018, S. 430.

Clarivate Analytics 2019

Clarivate Analytics: *Web of Science*, 2019. URL: www.webofknowledge.com [Stand: 01.08.2019].

COMPASS 2019

COMPASS: *COMPASS*, 2019. URL: <http://compass.web.ua.pt/> [Stand: 19.09.2019].

Cranford/Buehler 2012

Cranford, S. W./Buehler, M. J.: *Biomateriomics*, Dordrecht: Springer Netherlands 2012.

Cubo et al. 2016

Cubo, N./Garcia, M./del Cañizo, J. F./Velasco, D./Jorcano, J. L.: „3D Bioprinting of Functional Human Skin: Production and In Vivo Analysis“. In: *Biofabrication*, 9: 1, 2016, S. 15006.

Dau et al. 2019

Dau, H./Kurz, P./Weitze, M.-D.: *Künstliche Photosynthese: Besser als die Natur?*, Berlin: Springer-Verlag 2019.

Dennler et al. 2009

Dennler, G./Scharber, M. C./Brabec, C. J.: „Polymer-fullerene Bulk-heterojunction Solar Cells“. In: *Advanced Materials*, 21: 13, 2009, S. 1323–1338.

Deutsche Forschungsgemeinschaft 2018

Deutsche Forschungsgemeinschaft: *Förderatlas 2018* (Kennzahlen zur öffentlich finanzierten Forschung in Deutschland), 2018.

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. 2015

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.: *Werkstoffe mit Zukunft – Zukunft mit Werkstoffen* (Expertenbroschüre), 2015.

Dubus/Bresin 2013

Dubus, G./Bresin, R.: „A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities“. In: *PLOS ONE*, 8: 12, 2013, S. e82491.

Eder et al. 2018

Eder, M./Amini, S./Fratzl, P.: „Biological Composites – Complex Structures for Functional Diversity“. In: *Science*, 362: 6414, 2018, S. 543–547.

El-Tamer et al. 2017

El-Tamer, A./Hinze, U./Chichkov, B. N.: „3D Mikro- und Nano-Strukturierung mittels Zwei-Photonen-Polymerisation“. In: Lachmayer, R., Lippert, R. B. (Hrsg.), *Additive Manufacturing Quantifiziert*, Osnabrück: Springer 2017, S. 117–132.

Emulate Inc. 2019

Emulate Inc.: *Emulate*, 2019. URL: <https://www.emulatebio.com> [Stand: 19.09.2019].

Estrin et al. 2019

Estrin, Y./Bréchet, Y./Dunlop, J./Fratzl, P.: *Architected Materials in Nature and Engineering*, Cham, Schweiz: Springer 2019.

European Commission 2019

European Commission: *FET Flagships*, 2019. URL: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/fet-flagships> [Stand: 30.07.2019].

European Society for Biomaterials 1987

European Society for Biomaterials (Hrsg.): *Definitions in Biomaterials. Proceedings*, Amsterdam: Elsevier Science Limited 1987.

Festo Didactic SE 2019

Festo Didactic SE: *Bionics4Education*, 2019. URL: www.bionics4education.com [Stand: 19.09.2019].

Fratzl 2007

Fratzl, P.: „Biomimetic Materials Research: What Can We Really Learn from Nature's Structural Materials?“. In: *Journal of The Royal Society Interface*, 4: 15, 2007, S. 637–642.

Fratzl 2016

Fratzl, P.: „Bioinspirierte Gestaltung von Materialien“. In: Doll, N./Bredekamp, H./Schäffner, W. (Hrsg.), *+ultra. gestaltung schafft wissen*, Leipzig: E.A. Seemann 2016, S. 177–182.

Fratzl et al. 2020

Fratzl, P./Friedman, M./Krauthausen, K./Schäffner, W. (Hrsg.): *Active Materials*, Berlin, i. E.: de Gruyter 2020.

Fratzl/Weinkamer 2007

Fratzl, P./Weinkamer, R.: „Nature's Hierarchical Materials“. In: *Progress in Materials Science*, 52: 8, 2007, S. 1263–1334.

Freudenberg et al. 2016

Freudenberg, U./Liang, Y./Kiick, K. L./Werner, C.: „Glycosaminoglycan-based Biohybrid Hydrogels: A Sweet and Smart Choice for Multifunctional Biomaterials“. In: *Advanced Materials*, 28: 40, 2016, S. 8861–8891.

Frey et al. 2018

Frey, M./Widner, D./Segmehl, J. S./Casdorff, K./Keplinger, T./Burgert, I.: „Delignified and Densified Cellulose Bulk Materials with Excellent Tensile Properties for Sustainable Engineering“. In: *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10: 5, 2018, S. 5030–5037.

Frey et al. 2019

Frey, M./Biffi, G./Adobes-Vidal, M./Zirkelbach, M./Wang, Y./Tu, K./Hirt, A. M./Masania, K./Burgert, I./Keplinger, T.: „Tunable Wood by Reversible Interlocking and Bioinspired Mechanical Gradients“. In: *Advanced Science (Weinheim, Baden-Württemberg, Germany)*, 6: 10, 2019, S. 1802190.

Friedman/Krauthausen 2017

Friedman, M./Krauthausen, K.: „Inspired Mechanics. Active Matter as Machine and Structure“. In: Doll, N./Bredekamp, H./Schäffner, W. (Hrsg.), *+ultra. knowledge & gestaltung*, Leipzig: E.A. Seemann 2017, S. 167–172.

Fundacao para a Ciencia e a Tecnologia 2019

Fundacao para a Ciencia e a Tecnologia: *Collaborative Laboratories*, 2019. URL: <https://www.fct.pt/apoios/CoLAB/index.phtml.en> [Stand: 30.07.2019].

Gantenbein et al. 2018

Gantenbein, S./Masania, K./Woigk, W./Sesseg, J. P. W./Tervoort, T. A./Studart, A. R.: „Three-dimensional Printing of Hierarchical Liquid-Crystal-Polymer Structures“. In: *Nature*, 561: 7722, 2018, S. 226.

Gardiner 2018

Gardiner, M.: „ORI* On the Aesthetics of Folding and Technology“ (Dissertation), University of Newcastle, Newcastle, Australia 2018.

Gkoupidenis et al. 2017

Gkoupidenis, P./Koutsouras, D. A./Malliaras, G. G.: „Neuromorphic Device Architectures with Global Connectivity through Electrolyte Gating“. In: *Nature Communications*, 8, 2017, S. 15448.

Glasmacher et al. 2020

Glasmacher, B./Urban, G. A./Sternberg, K. (Hrsg.): *Biomedizinische Technik – Biomaterialien, Implantate und Tissue Engineering*, Berlin, i. E.: de Gruyter 2020.

Gorb 2006

Gorb, S.: „Functional Surfaces in Biology: Mechanisms and Applications“. In: Bar-Cohen, Y. (Hrsg.), *Biomimetics. Biologically Inspired Technologies*, Boca Raton, FL: CRC Press 2006, S. 381–397.

Gorb 2009

Gorb, S.: „Haare mit unbeschränkter Haftung“. In: *labor&more*: 1/09, 2009, S. 34–39.

Gorb et al. 2006

Gorb, S./Varenberg, M./Peressadko, A./Tuma, J.: „Biomimetic Mushroom-shaped Fibrillar Adhesive Microstructure“. In: *Journal of The Royal Society Interface*, 4: 13, 2006, S. 271–275.

Gorb et al. 2007

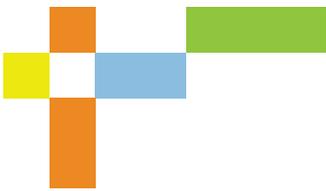
Gorb, S. N./Sinha, M./Peressadko, A./Daltorio, K. A./Quinn, R. D.: „Insects Did It First: A Micropatterned Adhesive Tape for Robotic Applications“. In: *Bioinspiration & Biomimetics*, 2: 4, 2007, S. 117.

Gorb/Varenberg 2007

Gorb, S. N./Varenberg, M.: „Mushroom-shaped Geometry of Contact Elements in Biological Adhesive Systems“. In: *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21: 12–13, 2007, S. 1175–1183.

Green/Elisseeff 2016

Green, J. J./Elisseeff, J. H.: „Mimicking Biological Functionality with Polymers for Biomedical Applications“. In: *Nature*, 540: 7633, 2016, S. 386.

**Groll et al. 2016**

Groll, J./Boland, T./Blunk, T./Burdick, J. A./Cho, D.-W./Dalton, P. D./Derby, B./Forgacs, G./Li, Q./Mironov, V. A.: „Biofabrication: Reappraising the Definition of an Evolving Field“. In: *Biofabrication*, 8: 1, 2016, S. 13001.

Groll et al. 2018

Groll, J./Burdick, J. A./Cho, D. W./Derby, B./Gelinsky, M./Heilshorn, S. C./Jüngst, T./Malda, J./Mironov, V. A./Nakayama, K.: „A Definition of Bioinks and Their Distinction from Biomaterial Inks“. In: *Biofabrication*, 11: 1, 2018, S. 13001.

Grunwald et al. 2009

Grunwald, I./Rischka, K./Kast, S. M./Scheibel, T./Bargel, H.: „Mimicking Biopolymers on a Molecular Scale: Nano(Bio)-technology Based on Engineered Proteins“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367: 1894, 2009, S. 1727-1747.

Guiducci et al. 2016

Guiducci, L./Dunlop, J. W. C./Fratzl, P.: „An Introduction into the Physics of Self-folding Thin Structures“. In: Schäffner, W./Friedman, M. (Hrsg.), *On Folding: Introduction of a New Field of Interdisciplinary Research*, Bielefeld: transcript Verlag 2016, S. 175-210.

Guiducci/Razghandi et al. 2016

Guiducci, L./Razghandi, K./Bertinetti, L./Turcaud, S./Rüggeberg, M./Weaver, J. C./Fratzl, P./Burgert, I./Dunlop, J. W. C.: „Honeycomb Actuators Inspired by the Unfolding of Ice Plant Seed Capsules“. In: *PLOS ONE*, 11: 11, 2016, S. e0163506.

Haas et al. 2018

Haas, T./Krause, R./Weber, R./Demler, M./Schmid, G.: „Technical Photosynthesis Involving CO₂ Electrolysis and Fermentation“. In: *Nature Catalysis*, 1: 1, 2018, S. 32.

Harvey et al. 2017

Harvey, D./Bardelang, P./Goodacre, S. L./Cockayne, A./Thomas, N. R.: „Antibiotic Spider Silk: Site-Specific Functionalization of Recombinant Spider Silk Using “Click” Chemistry“. In: *Advanced Materials*, 29: 10, 2017, S. 1604245.

He et al. 2016

He, K./Zhang, X./Ren, S./Sun, J.: „Deep Residual Learning for Image Recognition“. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.), *Proceedings, 2016 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2016*.

He et al. 2017

He, F./Chiou, A. E./Loh, H. C./Lynch, M./Seo, B. R./Song, Y. H./Lee, M. J./Hoerth, R./Bortel, E. L./Willie, B. M./Duda, G. N./Estroff, L. A./Masic, A./Wagermaier, W./Fratzl, P./Fischbach, C.: „Multiscale Characterization of the Mineral Phase at Skeletal Sites of Breast Cancer Metastasis“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114: 40, 2017, S. 10542-10547.

Hesse 1943

Hesse, H.: *Das Glasperlenspiel*, Zürich: Fretz und Wasmuth 1943.

Hook et al. 2012

Hook, A. L./Chang, C.-Y./Yang, J./Luckett, J./Cockayne, A./Atkinson, S./Mei, Y./Bayston, R./Irvine, D. J./Langer, R.: „Combinatorial Discovery of Polymers Resistant to Bacterial Attachment“. In: *Nature Biotechnology*, 30: 9, 2012, S. 868.

Hotaling et al. 2015

Hotaling, N. A./Tang, L./Irvine, D. J./Babensee, J. E.: „Biomaterial Strategies for Immunomodulation“. In: *Annual Review of Biomedical Engineering*, 17, 2015, S. 317-349.

Hubbell et al. 2009

Hubbell, J. A./Thomas, S. N./Swartz, M. A.: „Materials Engineering for Immunomodulation“. In: *Nature*, 462: 7272, 2009, S. 449-460.

Huber et al. 2005

Huber, G./Mantz, H./Spolenak, R./Mecke, K./Jacobs, K./Gorb, S. N./Arzt, E.: „Evidence for Capillarity Contributions to Gecko Adhesion from Single Spatula Nanomechanical Measurements“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102: 45, 2005, S. 16293-16296.

Hull 1986

Hull, C. W.: „Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Stereolithography“. U.S. Patent: US4575330A 1986.

Humboldt-Universität zu Berlin 2019

Humboldt-Universität zu Berlin: *Matters of Activity*. Image Space Material. A New Culture of Material, 2019. URL: <https://www.matters-of-activity.hu-berlin.de> [Stand: 12.07.2019].

Israelachvili 2011

Israelachvili, J. N.: *Intermolecular and Surface Forces*, Amsterdam: Academic press 2011.

Jungst et al. 2016

Jungst, T./Smolan, W./Schacht, K./Scheibel, T./Groll, J.: „Strategies and Molecular Design Criteria for 3D Printable Hydrogels“. In: *Chemical Reviews*, 116: 3, 2016, S. 1496–1539.

Kang et al. 2016

Kang, H.-W./Lee, S. J./Ko, I. K./Kengla, C./Yoo, J. J./Atala, A.: „A 3D Bioprinting System to Produce Human-scale Tissue Constructs with Structural Integrity“. In: *Nature Biotechnology*, 34: 3, 2016, S. 312.

Ketterer et al. 2016

Ketterer, P./Willner, E. M./Dietz, H.: „Nanoscale Rotary Apparatus Formed from Tight-fitting 3D DNA Components“. In: *Science Advances*, 2: 2, 2016, e1501209.

Knippers et al. 2019

Knippers, J./Schmid, U./Speck, T. (Hrsg.): *Biomimetics for Architecture. Learning from Nature*, Basel: Birkhäuser 2019.

Koch et al. 2016

Koch, C./Eber, F. J./Azucena, C./Förste, A./Walheim, S./Schimmel, T./Bittner, A. M./Jeske, H./Gliemann, H./Eiben, S.: „Novel Roles for Well-known Players: From Tobacco Mosaic Virus Pests to Enzymatically Active Assemblies“. In: *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 7: 1, 2016, S. 613–629.

Lenarz 2017

Lenarz, T.: „Cochlear Implant – State of the Art“. In: *GMS Current Topics in Otorhinolaryngology – Head and Neck Surgery*: 16, 2017, Doc04.

Lewandowska et al. 2017

Lewandowska, U./Zajaczkowski, W./Corra, S./Tanabe, J./Borrmann, R./Benetti, E. M./Stappert, S./Watanabe, K./Ochs, N. A. K./Schaeublin, R.: „A Triaxial Supramolecular Weave“. In: *Nature Chemistry*, 9: 11, 2017, S. 1068.

Liao et al. 2006

Liao, S./Li, B./Ma, Z./Wei, H./Chan, C./Ramakrishna, S.: „Biomimetic Electrospun Nanofibers for Tissue Regeneration“. In: *Biomedical Materials*, 1: 3, 2006, S. R45-53.

Lin et al. 2013

Lin, H./Gomez, I./Meredith, J. C.: „Pollenkitt Wetting Mechanism Enables Species-specific Tunable Pollen Adhesion“. In: *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 29: 9, 2013, S. 3012–3023.

Liverani et al. 2019a

Liverani, L./Killian, M. S./Boccaccini, A. R.: „Fibronectin Functionalized Electrospun Fibers by Using Benign Solvents: Best Way to Achieve Effective Functionalization“. In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 2019, S. 68.

Liverani et al. 2019b

Liverani, L./Raffel, N./Fattahi, A./Preis, A./Hoffmann, I./Boccaccini, A. R./Beckmann, M. W./Dittrich, R.: „Electrospun Patterned Porous Scaffolds for the Support of Ovarian Follicles Growth: A Feasibility Study“. In: *Scientific Reports*, 9, 2019, S. 1150.

Loskill/Huebsch 2019

Loskill, P./Huebsch, N.: „Engineering Tissues from Induced Pluripotent Stem Cells“. In: *Tissue Engineering Part A*, 25: 9-10, 2019, S. 707–710.

Lutolf/Hubbell 2005

Lutolf, M. P./Hubbell, J. A.: „Synthetic Biomaterials as Instructive Extracellular Microenvironments for Morphogenesis in Tissue Engineering“. In: *Nature Biotechnology*, 23: 1, 2005, S. 47.

Malda et al. 2013

Malda, J./Visser, J./Melchels, F. P./Jüngst, T./Hennink, W. E./Dhert, W. J. A./Groll, J./Hutmacher, D. W.: „25th Anniversary Article: Engineering Hydrogels for Biofabrication“. In: *Advanced Materials*, 25: 36, 2013, S. 5011–5028.

McCreery 2004

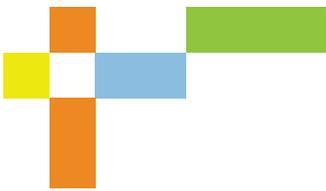
McCreery, D.: „Tissue Reaction to Electrodes: The Problem of Safe and Effective Stimulation of Neural Tissue“. In: Horch, K. W./Dhillon, G. S. (Hrsg.), *Neuroprosthetics: World Scientific 2004 (Series on Bioengineering and Biomedical Engineering Volume 2)*, S. 592–611.

Mei et al. 2010

Mei, Y./Saha, K./Bogatyrev, S. R./Yang, J./Hook, A. L./Kalcioğlu, Z. I./Cho, S.-W./Mitalipova, M./Pyzocha, N./Rojas, F.: „Combinatorial Development of Biomaterials for Clonal Growth of Human Pluripotent Stem Cells“. In: *Nature Materials*: 9, 2010, S. 768.

Merindol/Walther 2017

Merindol, R./Walther, A.: „Materials Learning from Life: Concepts for Active, Adaptive and Autonomous Molecular Systems“. In: *Chemical Society Reviews*, 46: 18, 2017, S. 5588–5619.

**Minev et al. 2015**

Minev, I. R./Musienko, P./Hirsch, A./Barraud, Q./Wenger, N./Moraud, E. M./Gandar, J./Capogrosso, M./Milekovic, T./Asboth, L.: „Electronic Dura Mater for Long-term Multimodal Neural Interfaces“. In: *Science*, 347: 6218, 2015, S. 159-163.

Montano et al. 2018

Montano, V./Smits, A./Garcia, S. J.: „The Bio-touch: Increasing Coating Functionalities via Biomass-derived Components“. In: *Surface and Coatings Technology*, 341, 2018, S. 2-14.

Murphy/Atala 2014

Murphy, S. V./Atala, A.: „3D Bioprinting of Tissues and Organs“. In: *Nature Biotechnology*, 32: 8, 2014, S. 773.

Murphy et al. 2016

Murphy, W./Black, J./Hastings, G.: *Handbook of Biomaterial Properties*, New York: Springer-Verlag 2016.

Ngo et al. 2018

Ngo, T. D./Kashani, A./Imbalzano, G./Nguyen, K. T. Q./Hui, D.: „Additive Manufacturing (3D printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges“. In: *Composites Part B: Engineering*, 143, 2018, S. 172-196.

Nudelman/Sommerdijk 2012

Nudelman, F./Sommerdijk, N. A.: „Biominalisation als Inspirationsquelle für die Materialchemie“. In: *Angewandte Chemie*, 124: 27, 2012, S. 6686-6700.

Parker et al. 2016

Parker, R. M./Frka-Petescic, B./Guidetti, G./Kamita, G./Consani, G./Abell, C./Vignolini, S.: „Hierarchical Self-assembly of Cellulose Nanocrystals in a Confined Geometry“. In: *ACS Nano*, 10: 9, 2016, S. 8443-8449.

Parker et al. 2018

Parker, R. M./Guidetti, G./Williams, C. A./Zhao, T./Narkevicius, A./Vignolini, S./Frka-Petescic, B.: „The Self-Assembly of Cellulose Nanocrystals: Hierarchical Design of Visual Appearance“. In: *Advanced Materials*, 30: 19, 2018, S. 1704477.

Paul-Ehrlich-Institut 2006

Paul-Ehrlich-Institut: *Gewerbezubereitungen*, 2006. URL: https://www.pei.de/DE/arzneimittel/gewebezubereitungen/gewebezubereitungen-node.html;jsessionid=08A49878E280EF01135F96F01C886B1C.1_cid319 [Stand: 19.07.2019].

Paulose et al. 2012

Paulose, J./Vliegenthart, G. A./Gompper, G./Nelson, D. R.: „Fluctuating Shells under Pressure“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109: 48, 2012, S. 19551-19556.

Peters et al. 2016

Peters, E./Heuberger, J. A./Tiessen, R./van Elsas, A./Masereeuw, R./Arend, J./Stevens, J./Pickkers, P.: „Pharmacokinetic Modeling and Dose Selection in a Randomized, Double-blind, Placebo-controlled Trial of a Human Recombinant Alkaline Phosphatase in Healthy Volunteers“. In: *Clinical Pharmacokinetics*, 55: 10, 2016, S. 1227-1237.

Picker et al. 2017

Picker, A./Nicoleau, L./Burghard, Z./Bill, J./Zlotnikov, I./Labbez, C./Nonat, A./Cölfen, H.: „Mesocrystalline Calcium Silicate Hydrate: A Bioninspired Route Towards Elastic Concrete Materials“. In: *Science Advances*, 3: 11, 2017, S. e1701216.

Pickkers et al. 2018

Pickkers, P./Mehta, R. L./Murray, P. T./Joannidis, M./Molitoris, B. A./Kellum, J. A./Bachler, M./Hoste, E. A. J./Hoiting, O./Krell, K.: „Effect of Human Recombinant Alkaline Phosphatase on 7-Day Creatinine Clearance in Patients with Sepsis-associated Acute Kidney Injury: A Randomized Clinical Trial“. In: *Journal of the American Medical Association*, 320: 19, 2018, S. 1998-2009.

Place et al. 2009

Place, E. S./Evans, N. D./Stevens, M. M.: „Complexity in Biomaterials for Tissue Engineering“. In: *Nature Materials*, 8: 6, 2009, S. 457.

Plant Biomechanics Group Freiburg 2013

Plant Biomechanics Group Freiburg: *Die Bionik-Vitrine*, 2013. URL: <http://www.bionik-vitrine.de> [Stand: 19.09.2019].

Plant Biomechanics Group Freiburg 2016a

Plant Biomechanics Group Freiburg: *BionicsLab*, 2016. URL: <http://www.bionik-online.de/bionicslab/> [Stand: 19.09.2019].

Plant Biomechanics Group Freiburg 2016b

Plant Biomechanics Group Freiburg: *Bionik-online*, 2016. URL: <http://www.bionik-online.de> [Stand: 19.09.2019].

Plant Biomechanics Group Freiburg 2016c

Plant Biomechanics Group Freiburg: *Bionik-Quiz*, 2016. URL: <https://www.bionik-online.de/bionik-quiz/> [Stand: 19.09.2019].

Poly-PEDAL Lab 2019

Poly-PEDAL Lab: *The Science of Motion*, 2019. URL: <http://polypedal.berkeley.edu/> [Stand: 19.07.2019].

Power to X Allianz 2019

Power to X Allianz: *Power to X Allianz*, 2019. URL: www.ptx-allianz.de [Stand: 30.07.2019].

Preiss et al. 2014

Preiss, L. C./Landfester, K./Muñoz-Espí, R.: „Biopolymer Colloids for Controlling and Templating Inorganic Synthesis“. In: *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 5: 1, 2014, S. 2129–2138.

Prewitz et al. 2013

Prewitz, M. C./Seib, F. P./Bonin, M. von/Friedrichs, J./Stiibel, A./Niehage, C./Müller, K./Anastassiadis, K./Waskow, C./Hoflack, B.: „Tightly Anchored Tissue-mimetic Matrices as Instructive Stem Cell Microenvironments“. In: *Nature Methods*, 10: 8, 2013, S. 788.

Prusinkiewicz/Barbier de Reuille 2010

Prusinkiewicz, P./Barbier de Reuille, P.: „Constraints of Space in Plant Development“. In: *Journal of Experimental Botany*, 61: 8, 2010, S. 2117–2129.

Qin/Buehler 2019

Qin, Z./Buehler, M. J.: „Analysis of the Vibrational and Sound Spectrum of over 100,000 Protein Structures and Application in Sonification“. In: *Extreme Mechanics Letters*, 29, 2019, S. 100460.

Ranga et al. 2014

Ranga, A./Gobaa, S./Okawa, Y./Mosiewicz, K./Negro, A./Lutolf, M. P.: „3D Niche Microarrays for System-level Analyses of Cell Fate“. In: *Nature Communications*, 5, 2014, S. 4324.

Road to Bio 2019

Road to Bio: *Roadmap for the Chemical Industry in Europe towards a Bioeconomy* (Report), 2019.

Römer/Scheibel 2007

Römer, L./Scheibel, T.: „Spinnenseidenproteine: Grundlage für neue Materialien“. In: *Chemie in unserer Zeit*, 41: 4, 2007, S. 306–314.

Russell 2014

Russell, A. J.: „The End of the Beginning for Tissue Engineering“. In: *The Lancet*, 383: 9913, 2014, S. 193–195.

Sadtler et al. 2016

Sadtler, K./Singh, A./Wolf, M. T./Wang, X./Pardoll, D. M./Elisseeff, J. H.: „Design, Clinical Translation and Immunological Response of Biomaterials in Regenerative Medicine“. In: *Nature Reviews Materials*, 1: 7, 2016, S. 16040.

Schäffner 2015

Schäffner, W.: „Interdisziplinäre Gestaltung. Einladung in das neue Feld einer Geistes- und Materialwissenschaft“. In: Bredekamp, H./Schäffner, W. (Hrsg.), *Haare hören – Strukturen wissen – Räume agieren.*, Bielefeld: transcript Verlag 2015 (Berichte aus dem Interdisziplinären Labor »Bild Wissen Gestaltung«), S. 199–213.

Schäffner 2016a

Schäffner, W.: „Immaterialität der Materialien“. In: Doll, N./Bredekamp, H./Schäffner, W. (Hrsg.), *+ultra. gestaltung schafft wissen*, Leipzig: E.A. Seemann 2016, S. 27–35.

Schäffner 2016b

Schäffner, W.: „Neuer Strukturalismus. Eine Geistes- und Materialwissenschaft“. In: Technische Universität Graz (Hrsg.), *Structural Affairs, Potenziale und Perspektiven der Zusammenarbeit in Planung, Entwurf und Konstruktion*, Berlin: Birkhäuser 2016 (Graz Architecture Magazine 12), S. 10–31.

Schäffner 2017

Schäffner, W.: „Immateriality of Materials“. In: Doll, N./Bredekamp, H./Schäffner, W. (Hrsg.), *+ultra. knowledge & gestaltung*, Leipzig: E.A. Seemann 2017, S. 23–32.

Schmidhuber 2015

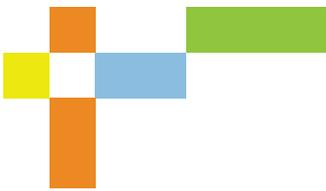
Schmidhuber, J.: „Deep Learning in Neural Networks: An Overview“. In: *Neural Networks*, 61, 2015, S. 85–117.

Seidi et al. 2011

Seidi, A./Ramalingam, M./Elloumi-Hannachi, I./Ostrovidov, S./Khademhosseini, A.: „Gradient Biomaterials for Soft-to-hard Interface Tissue Engineering“. In: *Acta Biomaterialia*, 7: 4, 2011, S. 1441–1451.

Silver et al. 2016

Silver, D./Huang, A./Maddison, C. J./Guez, A./Sifre, L./van den Driessche, G./Schrittwieser, J./Antonoglou, I./Panneershelvam, V./Lanctot, M./Dieleman, S./Grewe, D./Nham, J./Kalchbrenner, N./Sutskever, I./Lillicrap, T./Leach, M./Kavukcuoglu, K./Graepel, T./Hassabis, D.: „Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search“. In: *Nature*, 529, 2016, S. 484.



Singelyn/Christman 2010

Singelyn, J. M./Christman, K. L.: „Injectable Materials for the Treatment of Myocardial Infarction and Heart Failure: The Promise of Decellularized Matrices“. In: *Journal of Cardiovascular Translational Research*, 3: 5, 2010, S. 478–486.

Slimy Green Stuff 2015

Slimy Green Stuff: *Slimy Green Stuff*, 2015. URL: <http://slimy-greenstuff.com/> [Stand: 19.09.2019].

Speck/Speck 2007

Speck, O./Speck, T.: „Fachübergreifende Schulversuche zum Thema Bionik“. In: Kesel, A. B./Zehren, D. (Hrsg.), *Bionik: Patente aus der Natur*, Bremen: Bionik-Innovations-Centrum B-I-C – Bremen 2007, S. 148–156.

Speck/Speck 2009

Speck, T./Speck, O.: „Bionische Innovationen“. In: *TEC 21*: 135, 2009, S. 22–25.

Speck et al. 2012

Speck, T./Speck, O./Neinhuis, C./Bargel, H.: *Bionik: Faszinierende Lösungen der Natur für die Technik der Zukunft*, Freiburg: Lavori 2012.

Speck et al. 2013

Speck, T./Bauer, G./Flues, F./Oelker, K./Rampf, M./Schüssele, A. C./Tapavicza, M. von/Bertling, J./Luchsinger, R./Nellesen, A.: „Bio-inspired Self-healing Materials“. In: Fratzl, P./Dunlop, J. W.C./Weinkamer, R. (Hrsg.), *Materials Design Inspired by Nature*, Cambridge, United Kingdom: The Royal Society of Chemistry 2013, S. 359–389.

Speck et al. 2017

Speck, O./Speck, D./Horn, R./Gantner, J./Sedlbauer, K. P.: „Biomimetic Bio-inspired Biomorph Sustainable? An Attempt to Classify and Clarify Biology-derived Technical Developments“. In: *Bioinspiration & Biomimetics*, 12: 1, 2017, S. 011004.

Stejskalová et al. 2019

Stejskalová, A./Oliva, N./England, F. J./Almquist, B. D.: „Biologically Inspired, Cell-Selective Release of Aptamer-Trapped Growth Factors by Traction Forces“. In: *Advanced Materials*, 31: 7, 2019, S. 1806380.

Studart 2016

Studart, A. R.: „Additive Manufacturing of Biologically-inspired Materials“. In: *Chemical Society Reviews*, 45: 2, 2016, S. 359–376.

Su et al. 2018

Su, I./Qin, Z./Saraceno, T./Krell, A./Mühlethaler, R./Bisshop, A./Buehler, M. J.: „Imaging and Analysis of a Three-dimensional Spider Web Architecture“. In: *Journal of The Royal Society Interface*, 15: 146, 2018, S. 20180193.

Tachibana et al. 2012

Tachibana, Y./Vayssieres, L./Durrant, J. R.: „Artificial Photosynthesis for Solar Water-splitting“. In: *Nature Photonics*, 6: 8, 2012, S. 511–518.

Teramoto et al. 2018

Teramoto, H./Amano, Y./Iraha, F./Kojima, K./Ito, T./Sakamoto, K.: „Genetic Code Expansion of the Silkworm *Bombyx Mori* to Functionalize Silk Fiber“. In: *ACS Synthetic Biology*, 7: 3, 2018, S. 801–806.

The Shift Project 2019

The Shift Project: *Lean ICT. Towards Digital Sobriety* (Report), 2019.

Timonen et al. 2013

Timonen, J. V. I./Latikka, M./Leibler, L./Ras, R. H. A./Ikkala, O.: „Switchable Static and Dynamic Self-assembly of Magnetic Droplets on Superhydrophobic Surfaces“. In: *Science*, 341: 6143, 2013, S. 253–257.

Tolikas et al. 2017

Tolikas, M./Antoniou, A./Ingber, D. E.: „The Wyss Institute: A New Model for Medical Technology Innovation and Translation across the Academic-industrial Interface“. In: *Bioengineering & Translational Medicine*, 2: 3, 2017, S. 247–257.

Tong et al. 2010

Tong, H.-W./Wang, M./Li, Z.-Y./Lu, W. W.: „Electrospinning, Characterization and In Vitro Biological Evaluation of Nanocomposite Fibers Containing Carbonated Hydroxyapatite Nanoparticles“. In: *Biomedical Materials*, 5: 5, 2010, S. 54111.

Vacanti 2006

Vacanti, C. A.: „The History of Tissue Engineering“. In: *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 10: 3, 2006, S. 569–576.

Van Opdenbosch et al. 2016

Van Opdenbosch, D./Fritz-Popovski, G./Wagermaier, W./Paris, O./Zollfrank, C.: „Moisture-Driven Ceramic Bilayer Actuators from a Biotemplating Approach“. In: *Advanced Materials*, 28: 26, 2016, S. 5235–5240.

Vantomme/Meijer 2019

Vantomme, G./Meijer, E. W.: „The Construction of Supramolecular Systems“. In: *Science*, 363: 6434, 2019, S. 1396–1397.

Varenberg/Gorb 2007

Varenberg, M./Gorb, S.: „Close-up of Mushroom-shaped Fibrillar Adhesive Microstructure: Contact Element Behaviour“. In: *Journal of The Royal Society Interface*, 5: 24, 2007, S. 785–789.

Vasilevich et al. 2017

Vasilevich, A. S./Carlier, A./de Boer, J./Singh, S.: „How Not to Drown in Data: A Guide for Biomaterial Engineers“. In: *Trends in Biotechnology*, 35: 8, 2017, S. 743–755.

VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences 2011

VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences: *Bionik – Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile* (VDI Richtlinie 6223), Berlin, 2011.

VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences 2012

VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences: *Bionik: Konzeption und Strategie – Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten* (VDI Richtlinie 6220), Berlin, 2012.

Vegas et al. 2016

Vegas, A. J./Veiseh, O./Doloff, J. C./Ma, M./Tam, H. H./Bratlie, K./Li, J./Bader, A. R./Langan, E./Olejnik, K.: „Combinatorial Hydrogel Library Enables Identification of Materials that Mitigate the Foreign Body Response in Primates“. In: *Nature Biotechnology*, 34: 3, 2016, S. 345.

Vignolini et al. 2012

Vignolini, S./Rudall, P. J./Rowland, A. V./Reed, A./Moyroud, E./Faden, R. B./Baumberg, J. J./Glover, B. J./Steiner, U.: „Pointillist Structural Color in Pollia Fruit“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109: 39, 2012, S. 15712–15715.

Vincent 2002

Vincent, J. F.V.: „Survival of the Cheapest“. In: *Materials Today*, 5: 12, 2002, S. 28–41.

Volkmer 1999

Volkmer, D.: „Von Biomineralien zu biomimetischen Materialien: Der Weg ist das Ziel“. In: *Chemie in unserer Zeit*, 33: 1, 1999, S. 6–19.

von Gleich et al. 2007

von Gleich, A./Pade, C./Petschow, U./Pissarskoi, E./Affinas, S.: *Bionik. Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale*, Bremen: ASCO STURM Druck 2007.

Waite 2017

Waite, J. H.: „Mussel Adhesion—essential Footwork“. In: *Journal of Experimental Biology*, 220: 4, 2017, S. 517–530.

Weber/Oberender 2014

Weber, M./Oberender, C.: *Ressourceneffizienz im Fokus der betrieblichen Kostenrechnung* (VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse 6), 2014.

Wegst et al. 2015

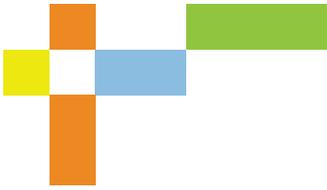
Wegst, U. G. K./Bai, H./Saiz, E./Tomsia, A. P./Ritchie, R. O.: „Bioinspired Structural Materials“. In: *Nature Materials*, 14: 1, 2015, S. 23.

Weinkamer/Fratzl 2011

Weinkamer, R./Fratzl, P.: „Mechanical Adaptation of Biological Materials—The Examples of Bone and Wood“. In: *Materials Science and Engineering: C*, 31: 6, 2011, S. 1164–1173.

Wißling 2006

Wißling, P.: *Metallic Effect Pigments: Fundamentals and Applications*: Vincentz Network GmbH & Co KG 2006.

**Yeo et al. 2018**

Yeo, J./Huang, W./Taranova, A./Zhang, Y.-W./Kaplan, D. L./Buehler, M. J.: „Unraveling the Molecular Mechanisms of Thermo-responsive Properties of Silk-elastin-like Proteins by Integrating Multiscale Modeling and Experiment“. In: *Journal of Materials Chemistry B*, 6: 22, 2018, S. 3727-3734.

Yu et al. 2019

Yu, C.-H./Qin, Z./Martin-Martinez, F. J./Buehler, M. J.: „A Self-Consistent Sonification Method to Translate Amino Acid Sequences into Musical Compositions and Application in Protein Design Using Artificial Intelligence“. In: *ACS Nano*, 13: 7, 2019, S. 7471-7482.

Zhao et al. 2019

Zhao, T. H./Parker, R. M./Williams, C. A./Lim, K. T. P./Frka-Petesc, B./Vignolini, S.: „Printing of Responsive Photonic Cellulose Nanocrystal Microfilm Arrays“. In: *Advanced Functional Materials*, 29: 21, 2019, S. 1804531.

Zollfrank 2014

Zollfrank, C.: „Biogene Polymere als Template: Herstellung anorganischer Struktur- und Funktionsmaterialien“. In: *Chemie in unserer Zeit*, 48: 4, 2014, S. 296-304.

Zollfrank et al. 2014

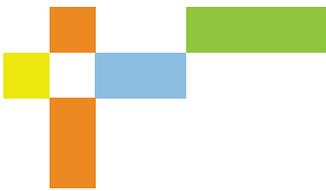
Zollfrank, C./Scheibel, T./Seitz, H./Travitzky, N.: „Bioinspired Materials Engineering“. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2014, S. 1-22.



acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de



Herausgeber:

Prof. Dr. Peter Fratzl
Max-Planck-Institut für Kolloid- und
Grenzflächenforschung
Potsdam Science Park
Am Mühlenberg
14476 Potsdam

Prof. Dr. Karin Jacobs
Universität des Saarlandes
Campus E2 9
66123 Saarbrücken

Prof. Dr. Martin Möller
DWI – Leibniz-Institut für
Interaktive Materialien e. V.
Forckenbeckstr. 50
52074 Aachen

Prof. Dr. Thomas Scheibel
Universität Bayreuth
Lehrstuhl Biomaterialien
Prof.Rüdiger-Bormann-Str.1
95447 Bayreuth

Prof. Dr. Katrin Sternberg
Aesculap AG
Am Aesculap Platz
78532 Tuttlingen

Reihenherausgeber:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2019

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0)89/52 03 09-0
F +49 (0)89/52 03 09-900

Hauptstadtbüro
Pariser Platz 4a
10117 Berlin
T +49 (0)30/2 06 30 96-0
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

Brüssel-Büro
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
1000 Brüssel (Belgien)
T +32 (0)2/2 13 81-80
F +32 (0)2/2 13 81-89

info@acatech.de
www.acatech.de

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier,
Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl, Prof. Dr. Hermann Requardt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier,
Prof. Dr. Martina Schraudner

Empfohlene Zitierweise:

Fratzl, P./Jacobs, K./Möller, M./Scheibel, T./Sternberg, K. (Hrsg.): *Materialforschung: Impulsgeber Natur – Innovationspotenzial biologisch inspirierter Materialien und Werkstoffe* (acatech DISKUSSION), München: utzverlag 2019.

ISSN 2192-6182

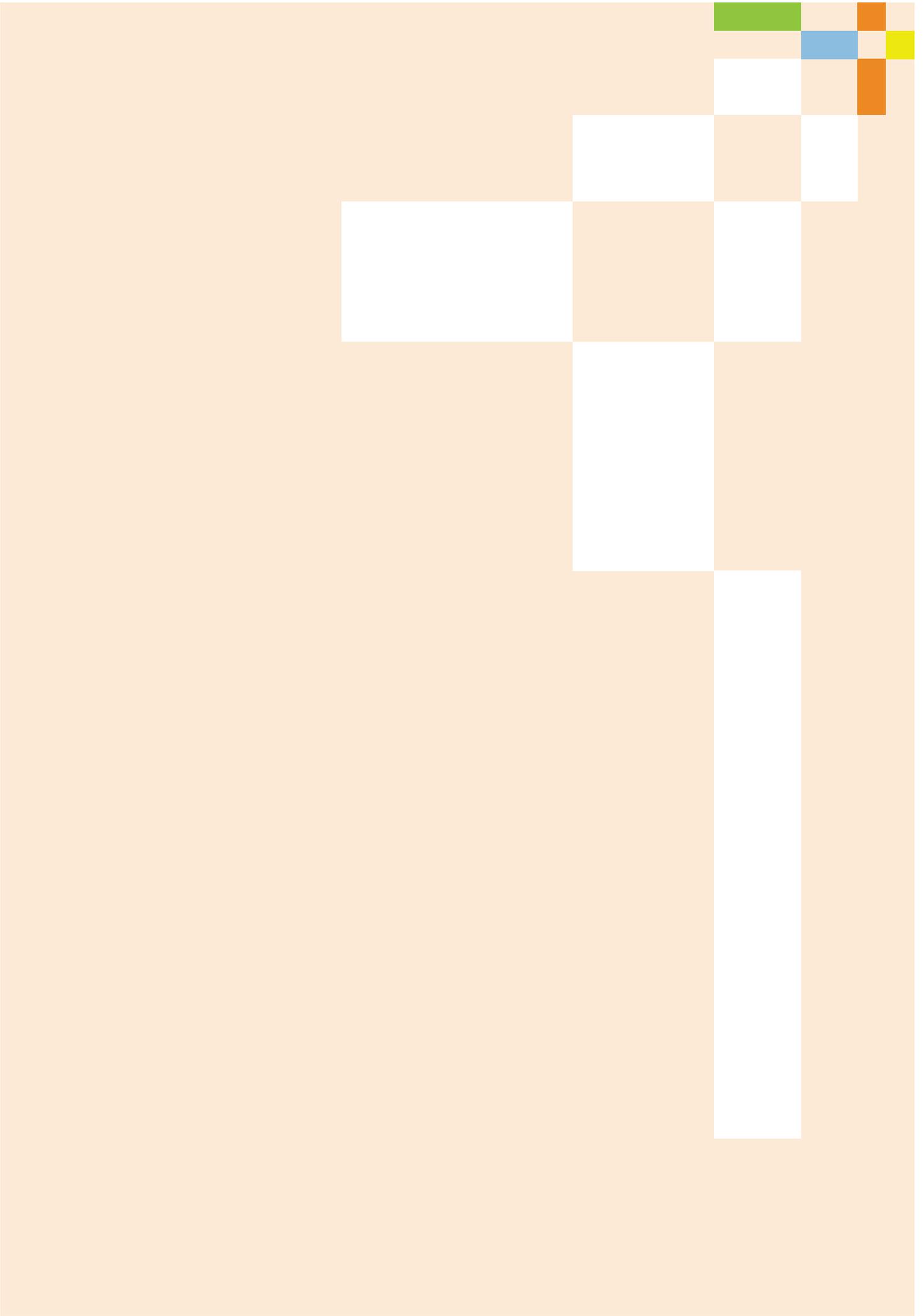
Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

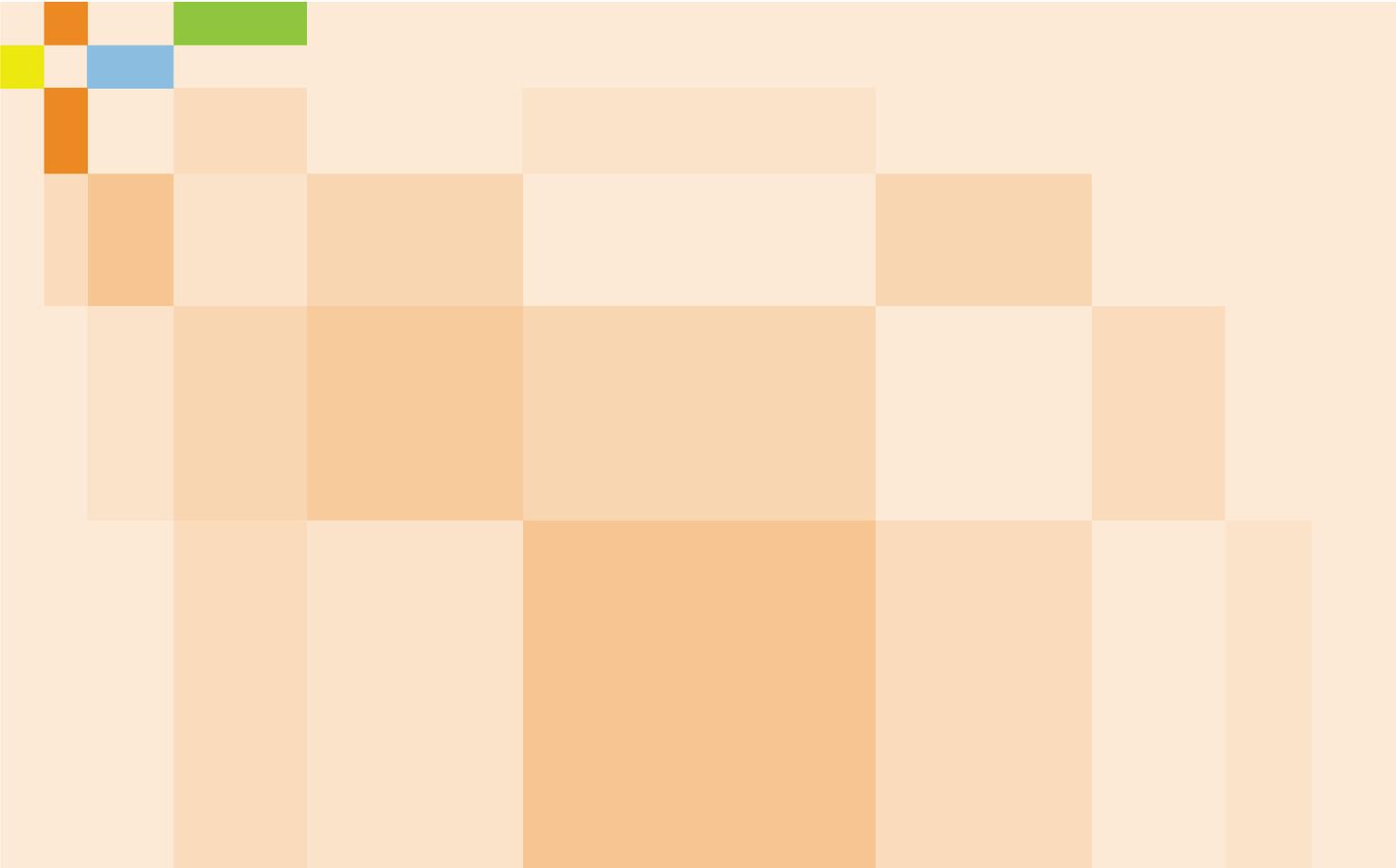
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Koordination: Dr. Lena Simon, Dr. Christine Metz-Schmid
Redaktion: Alrun Straudi
Layout-Konzeption: Groothuis, Hamburg
Lektorat: Lektorat Berlin
Übersetzung: Paul Clarke and Charlotte Couchman, Lodestar Translations
Konvertierung und Satz: Fraunhofer IAIS, Sankt Augustin

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.utzverlag.de





Materialien und Werkstoffe spielen in fast allen Technikbereichen und Produkten eine entscheidende Rolle. Demografische Entwicklung, knapper werdende Ressourcen sowie Klimawandel erfordern eine nachhaltigere Wirtschaftsweise – mit den sich ändernden Anforderungen steigt auch die zu beherrschende Komplexität in den Material- und Werkstoffwissenschaften. Besonders die Biologisierung der Materialforschung – das heißt, sich von der Natur inspirieren zu lassen, wie biologische Ressourcen, Prinzipien und Verfahren genutzt werden können, birgt große Innovationspotenziale für den Forschungs- und Wirtschaftsstandort Deutschland.

Die acatech DISKUSSION zeigt anhand von Beispielen die Vielfalt und große Bandbreite an möglichen Struktur-, Funktions- und Synthesepinzpien auf, mit denen die Natur die Materialforschung bereits 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.