



Das Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien  
Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies



# Report 2017

REPORT

2017

FIT

FREIBURGER ZENTRUM FÜR  
INTERAKTIVE WERKSTOFFE UND  
BIOINSPIRIERTE TECHNOLOGIEN



FIT

FIT

FREIBURGER ZENTRUM FÜR INTERAKTIVE WERKSTOFFE  
UND BIOINSPIRIERTE TECHNOLOGIEN

FREIBURG CENTER FOR INTERACTIVE MATERIALS AND  
BIOINSPIRED TECHNOLOGIES

Georges-Köhler-Allee 105

79110 Freiburg  
Germany

T: (+49) 761 203 67879

F: (+49) 761 203 4709

E: mail@fit.uni-freiburg.de

I: <http://www.fit.uni-freiburg.de>

Sekretariat: Jessica Hielscher, Jennifer Karl

Infomanagement: Manuel Birk

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Rolf Mülhaupt

Verwaltungsleiterin: Dr. Stefanie Meisen

Wissenschaftliche Koordinatorin: Dr. Olga Speck

Titelbild: Außenansicht des FIT, © Olga Speck, FIT, 2017

ISBN: 987-3-946018-03-2

# Inhaltsverzeichnis

FIT .....	2
Inhaltsverzeichnis .....	3
FIT – Das Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien .....	6
FIT – Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies.....	7
Auszüge aus dem FIT-Jahr .....	9
Excerpts of the FIT Year.....	9
Das Zentrum / The Center .....	10
Struktur / Structure.....	10
Forschungsfelder .....	10
Research Areas .....	10
Core Facilities .....	11
Core Facility "Bildgebung von Materialsystemen" .....	11
Core Facility "Imaging of Materials Systems" .....	14
Core Facility "Fertigungstechnik" .....	17
Core Facility "Functional Processing" .....	20
Core Facility "Modelling and Simulation of Materials Systems" .....	22
Core Facility "Modellierung und Simulation von Materialsystemen" .....	22
Leitung / Management.....	23
Direktorium / Directorate.....	23
Mitglieder / Members .....	23
Wissenschaftlicher Beirat / Advisory Board.....	24
Internes Beratungsgremium / Integrative Board.....	24
Zahlen und Finanzen .....	24
Figures and Finances .....	28
Highlights .....	29
Adaptive polymere Werkstoffe / Adaptive Polymer Materials .....	29
Quantitative Untersuchungen von Adhäsion und Reibung auf mikrostrukturierten Oberflächen: Inspiration von Insekt-Pflanze Interaktionen.....	29
Quantitative Investigations of Adhesion and Friction on Micro-Textured Surfaces: Inspiration from Insect-Plant Interactions .....	32
Kinetically driven structure formation in quasi-two dimensional systems.....	34
Biomimetische und biobasierte Materialien / Biomimetic and Bio-based Materials .....	37
DNA Prototellen und Hierarchische Materialien durch das Surfen von Energielandschaften .....	37
DNA Protocells and Hierarchical Materials based on Surfing Energy Landscapes .....	38
Bioinspirierte Energiedissipation in lasttragenden Systemen und Fassaden für das Bauwesen: Skalierungseigenschaften von porösen biologischen und biomimetischen Konstruktionen .....	39

## Inhaltsverzeichnis

Bioinspired energy dissipation in load bearing systems and facades for building construction: Scaling of properties of porous biological and biomimetic constructions .....	43
Adaptive Steifigkeit und gelenkfreie Bewegung bei stabförmigen Pflanzenorganen als Ideengeber für adaptive Baukonstruktionen .....	45
Adaptive stiffness and joint-free kinematics in rod-shaped plant organs as concept generators for adaptive building constructions .....	46
Das biomimetische Fassaden-Verschattungssystem Flectofold .....	47
The biomimetic façade shading device Flectofold .....	49
Bioinspirierte verzweigte Tragwerkselemente aus faserverbundverstärktem Beton: Biologische Vorbilder, Forschung und Entwicklung .....	50
Bio-inspired branched nodal elements out of fibre-reinforced concrete: Biological concept generators, research and development.....	52
Morphological changes of crystallizable diblock copolymer in quasi-2-dimensions .....	53
Energetische Untersuchungen zur induzierten Aufnahme von Partikeln in funktionalisierte, synthetische Membransysteme .....	55
Energetic investigations of induced particle uptake into functionalized synthetic membrane systems.....	58
Energieautarke (Mikro-Systeme) / Biomimetic and Bio-based Materials .....	60
Modeling Advanced Optics of Perovskite Silicon Solar Cells and Modules .....	60
Modeling Advanced Optics of Perovskite Silicon Solar Cells and Modules .....	61
Nanotomographische Untersuchung von Lithium-Luft-Batterien (Li-O <sub>2</sub> ) .....	62
Nanotomographic investigation of Lithium-Air (Li-O <sub>2</sub> ) batteries .....	65
Entwicklung eines Protokolls für hochauflösende Röntgentomographie zur Charakterisierung der Sonden-Gewebe-Interaktion implantierter passiver Cortex-Sonden in Ratten .....	66
Development of a non-destructive high-resolution X-ray tomography protocol for investigating the brain-probe-interface in rat cortex with implanted passive sensors.....	68
Core Facility "Modellierung und Simulation von Materialsystemen" / "Modelling and Simulation of Materials Systems" .....	70
Theoretische Erklärung der mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Spiropyrene .....	70
Theoretical explanation for the mechanical properties of different spiropyrans .....	72
Projekte / Projects .....	74
SFB-TRR 141 .....	74
„SFB-Transregio 141: Biologisches Design und integrative Strukturen – Analyse, Simulation und Übertragung in die Architektur“ – Jahr 3 .....	74
„SFB-Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – year 3 .....	78
ERC GRANT „TimePROSAMAT“ .....	81
Time-Programmed Self-Assemblies and Dynamic Materials” .....	81
Time-Programmed Self-Assemblies and Dynamic Materials” .....	81
IRTG 1642 .....	82
Internationales Graduiertenkolleg / International Research Training Group (IRTG) “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials” .....	82
International Research Training Group (IRTG) “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials”.....	84

ERC Starting Grant “REGENERATE” .....	85
Häuten oder nicht häuten, das ist hier die Frage. ....	85
To Shed, or Not to Shed – That Is the Question. ....	86
“ANTIBUG” .....	87
Simultan antimikrobielle, protein-abweisende und zellkompatible Polymere als Beschichtungen für Medizinprodukte .....	87
Towards Medical Products With Simultaneous Antimicrobial Activity, Protein- repellency and Cell-compatibility.....	88
Publikationen / Publications.....	90
Peer-reviewed publications .....	90
Books and book-chapters.....	91
Conference Proceedings .....	93
Editorial Work .....	93
Miscellaneous .....	93
Abschlussarbeiten / Thesis.....	94
Habilitationen .....	94
Promotionen .....	94
Diplom-, Bachelor-, Master- und Staatsexamensarbeiten .....	94
FIT-Kolloquium 2017 .....	96
Impressum .....	98

## FIT – DAS FREIBURGER ZENTRUM FÜR INTERAKTIVE WERKSTOFFE UND BIOINSPI- RIERTE TECHNOLOGIEN

Inspiriert durch das Vorbild der Natur eröffnet die interdisziplinäre FIT-Forschung den Zugang zu neuartigen Funktionsmaterialien und unkonventionellen lebensähnlichen Materialsystemen. Während heute Werkstoffe in der Regel noch passiv sind und ihre Eigenschaften über ihre gesamte Produktlebenszeit unverändert beibehalten, sind bioinspirierte Materialsysteme interaktiv, intelligent und anpassungsfähig. Sie können wechselnde Bedürfnisse der Menschen sowie Veränderungen ihrer Umwelt erkennen und darauf mit Eigenschafts- und Strukturveränderungen reagieren. Wie ihre biologischen Vorbilder sind lebensähnliche Materialsysteme energieautark. Die Energieversorgung und Energiespeicherung wird direkt in die Materialsysteme integriert und erfordert keine Energiezufuhr von außen durch Kabelverbindungen. In Zukunft werden lebensähnliche Materialsysteme die Menschen im täglichen Leben wirkungsvoll unterstützen und ihnen hohe Lebensqualität, Sicherheit und Gesundheit bringen. Durch ihre hohe Ressourcen-, Kosten-, Öko- und Energieeffizienz gepaart mit Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit leisten lebensähnliche Materialsysteme wichtige Beiträge zur nachhaltigen Entwicklung.

Das FIT-Team stellt sich diesen Herausforderungen und betreibt im FIT fakultäts-, institutio-ns- und länderübergreifende interdisziplinäre Grundlagenforschung an den Schnittstellen von Material-, Lebens- und Ingenieurwissen-schaften. Getragen von sechs Fakultäten (Biologie, Chemie & Pharmazie, Mathematik & Physik, Technik, Umwelt & Natürliche Res-sourcen, Medizin) ist das FIT eine zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Albert-Lud-wigs-Universität Freiburg. Bewilligt 2009 im Rahmen der „Zukunftsoffensive IV Innovation und Exzellenz des Landes Baden-Württem-berg“ und aufbauend auf den Freiburger For-schungsverbund "Bioinspirierte Technologien

und Systeme (BITS)“, wurde das FIT 2013 durch Senatsbeschluss an der Universität Freiburg eingerichtet. Das FIT bezog 2016 den Neubau, dessen Planung auf die Bedürfnisse der FIT-Forschung abgestimmt wurde.

Unter dem Dach des FIT werden die Freibur-ger Kernkompetenzen in Biologie, Chemie, Materialforschung, Physik, Mikrosystemtech-nik, Energietechnik, Polymerwissenschaften, Medizin und Bionik zusammengeführt. Zentrale FIT-Forschungsschwerpunkte sind Funk-tionsmaterialien und lebensähnliche Material-systeme, die sich am Vorbild der Natur ori-entieren wie z.B. adaptive Polymersysteme und intelligente Oberflächen, biobasierte und bio-funktionale Systeme sowie energieautarke Mikrosysteme. Zentrales Element der FIT-For-schung ist der Brückenschlag zwischen Bio-nik, Materialforschung, Mikrosystem- und Energietechnik. Die FIT-Forschung wird durch drei Core Facilities unterstützt, die gleichzeitig als Drehscheibe für die Interaktionen ver-schiedener Disziplinen wirken. Im Spezialla-bor für moderne Mikroskopie und Tomogra-phy, verbunden mit dem Aufbau eines Kom-petenznetzes für 3D-Visualisierung von Mate-rialsystemen, werden Architekturen und ska-lenübergreifende Wirkprinzipien biologischer und synthetischer Materialsysteme aufgeklärt. In der Technologieplattform Fertigungstechnik mit Schwerpunkten auf Folien-Druck-Technolo-gien werden neue Wege erforscht, kom-plexe multifunktionale Materialsysteme nach dem Vorbild der Natur ohne die bisher übliche große Zahl von Prozessschritten zu fertigen. Unterstützt wird die FIT-Forschung durch die Technologieplattform für Konzeptentwicklung, Modellierung und Simulation interaktiver Ma-terialien.

Heute hat sich das FIT fest in der Freiburger Forschungslandschaft etabliert und verankert die bioinspirierte Materialforschung in der Uni-versität. Im Einklang mit den Auflagen des Ge-meinnützigkeitsrechts betreibt das FIT erfolg-reich Grundlagenforschung über Funktions-materialien und unkonventionelle lebensähnli-che Materialsysteme. Wissenschaftliche Mit-glieder des Zentrums können Professorinnen und Professoren sowie Nachwuchsgruppen-

leiterinnen und Nachwuchsgruppenleiter werden, die Drittmittel einwerben und deren Forschung im Einklang mit dem FIT-Leitbild steht.

Ich danke allen Mitgliedern des FIT, den Mitarbeitern sowie Frau Dr. Meisen und ihrem Team, dass sie mit Elan und Begeisterung die FIT-Idee mit Leben füllen.



Prof. Dr. Rolf Mülhaupt

(Geschäftsführender Direktor)

## FIT – FREIBURG CENTER FOR INTERACTIVE MATERIALS AND BIOINSPIRED TECHNOLOGIES

Inspired by Nature, FIT research creates unique multifunctional materials and unconventional life-like materials systems. Whereas most state-of-the-art materials are passive and retain their property profiles during their entire product lifetime, bioinspired materials systems are interactive, smart and adaptive. They respond to variable needs of humans and changes of their environment by changing their structures and properties. Similar to living biosystems synthetic life-like materials systems are energy autonomous. Both, energy harvesting and energy storage, are integral parts of such materials systems and do not require external power supply by power cables. In future life-like materials systems will assist humans in daily life and bring them high quality of life, security and health. Owing to their high resource- cost-, eco- and energy efficiency teamed up with their extraordinary versatility and adaptation life-like materials will play a prominent role in sustainable development.

The FIT team meets these challenges by performing research crossing frontiers of faculties, institutions and countries at the interfaces of materials research, life sciences and engineering. Supported by six faculties (biology, chemistry & pharmacy, engineering, environment & natural resources, mathematics & physics, medicine) FIT is a central research institute of the University of Freiburg. Approved by the State of Baden-Württemberg within the frame of “Future Initiative IV Innovation and Excellence” and building on the foundation of the Freiburg joint research program “Bio-inspired Technologies and Systems (BITS)”, the Senate of the University inaugurated FIT in 2013. In 2016, FIT received a new building which was built taking into account the specific requirements of FIT research already in the early stages of planning.

Under the FIT roof the University of Freiburg is joining together their core competences in biology, chemistry, materials research, micro system engineering, energy technology, physics, polymer sciences, medicine, and biomimetics. The FIT research focus is being placed upon exploring functional materials and life-like materials systems drawing inspiration from Nature, e.g., adaptive polymer systems and smart surfaces, biobased and biofunctional systems, as well as energy-autonomous micro systems. The FIT research is building a strong bridge between biomimetics, materials research, micro system engineering and energy technology. Moreover, the FIT research is supported by three core facilities which serve as angle points for bringing together the members of different disciplines. The lab of advanced microscopy and tomography builds a center of competence for 3D visualization of materials systems, aiming at better understanding hierarchical architectures and multi-scale functions of biological and man-made materials systems. The core facility for processing with special emphasis on film and printing technologies explores new ways to simplify fabrication of complex multifunctional materials systems by significantly reducing the number of processing steps. The core facility for concept development, modeling and simulations provides guidance for the exploiting the prospects of interactive materials and materials systems.

Today FIT is well established in the Freiburg research environment, anchoring bioinspired research within the University of Freiburg. In accordance with legal constraints of a non-profit research center, the FIT research focus is exclusively being placed on basic sciences and engineering relating to functional materials and unconventional life-like materials systems. Professors as well as junior research group leaders are welcome to apply for FIT membership if they are willing to acquire third party funding doing research in compliance with the FIT research mission.

I would like to express my sincere gratefulness to all FIT members, coworkers, as well as Dr. Stefanie Meisen and her team for their efforts and enthusiasm bringing life to the FIT idea.



Prof. Dr. Rolf Mülhaupt

(Managing director)

## AUSZÜGE AUS DEM FIT-JAHR

Auf Einladung des Staatsministeriums Baden-Württemberg an herausragende Wissenschaftler/innen baden-württembergischer Hochschulen und Forschungseinrichtungen konnte sich das FIT im Rahmen der Abschlussveranstaltung des „*67th Lindau Nobel Laureate Meeting dedicated to the field of Chemistry*“ vorstellen (Abb. 1).



Abb. 1: Stellvertretend für die FIT-Mitarbeiter haben die wissenschaftliche Koordinatorin des FIT, Dr. O. Speck, und die Chemikerin Dr. R. Reiter die Arbeiten des FIT während der Schifffahrt von Lindau zur Insel Mainau präsentiert. © O. Speck

Im Jahr 2017 fanden verschiedene Veranstaltungen in den Räumen des FIT statt wie zum Beispiel das FIT-Kolloquium, verschiedene Workshops, Vorstandssitzungen, Delegationsbesuche und das Rector's Dinner (Abb. 2).



Abb. 2: Teilnehmer/innen bei einer Veranstaltung im FIT. © Sandra Meyndt (SMP)

In den Schauvitrinen im FIT-Eingangsbereich werden aktuell Exponate und Erklärungen aus verschiedenen Projekten des Transregio 141 (Abb. 3) sowie aus verschiedenen 3D-Drucktechniken hergestellte Beispielobjekte präsentiert.



Abb. 3: Schauvitrine im FIT. © O. Speck

## EXCERPTS OF THE FIT YEAR

Following an invitation of the State Ministry of Baden-Württemberg to outstanding scientists of universities and research institutions of Baden-Württemberg, FIT scientists had the possibility to present the FIT activities at the final event of "*67th Lindau Nobel Laureate Meeting dedicated to the field of Chemistry*" (Fig. 1).

In 2017, various events took place in the FIT research building, such as the FIT Colloquium, various workshops, board meetings, delegate visits and the Rector's Dinner (Fig. 2).

In the showcases in the entrance area of the FIT, demonstrators from and explanations on various CRC 141 projects (Fig. 3) are currently presented as well as examples produced with different 3D printing techniques.

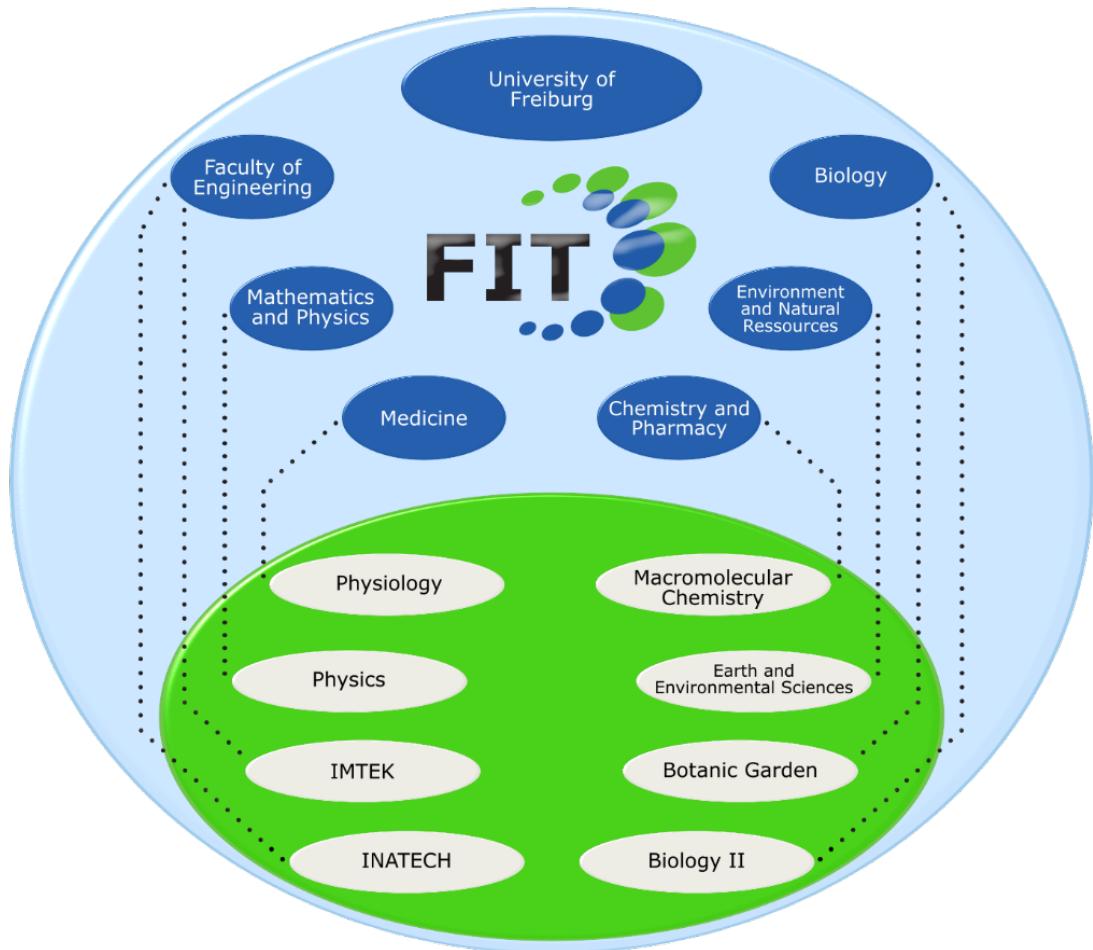
Fig. 1: During the shipping from Lindau to the island of Mainau the scientific coordinator of the FIT, Dr. O. Speck, and the chemist Dr. R. Reiter presented research projects on behalf of the FIT. © O. Speck

Fig. 2: Visitors at an event in the FIT. © Sandra Meyndt (SMP)

Fig. 3: Show case at FIT. © O. Speck

## DAS ZENTRUM / THE CENTER

### STRUKTUR / STRUCTURE



### FORSCHUNGSFELDER

- Interaktive Materialien und intelligente Oberflächen für adaptive polymere Werkstoffe
- Biopolymer-Hybridmaterialien, biofunktionale Makromolekulare Chemie, biobasierte Materialien und biohybride Mikrosysteme
- Integrierte energetische Materialien für die Energietechnik und bioinspirierte energieautarke (Mikro)System

### RESEARCH AREAS

- Interactive functional materials and smart surfaces for adaptive plastics
- New hybrids and biomimetic functionalization by joining together synthetic and biological components in order to render synthetic materials and (micro) systems capable of interacting with proteins, cells, and tissue
- Integrated energetic materials for power engineering and bioinspired energy autonomous micro systems

## CORE FACILITIES

### Core Facility "Bildgebung von Materialsystemen"

#### 3D-Visualisierung mit Speziallabor für Mikroskopie und Tomografie, Aufbau eines Kompetenznetzwerkes

Wissenschaftlicher Leiter:  
Prof. Dr. Rolf Mülhaupt<sup>1,2</sup>

Verantwortliche Managerin:  
Dr. Yi Thomann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Makromolekulare Chemie Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, <sup>2</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)



Abb. 1: Das Talos F200X HR-TEM im FIT (© Thomann)

#### Arbeitsgebiet:

Materialwissenschaftliche Mikroskopie mit Schwerpunkt Tomographie

- Hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie
- Cryo Elektronenmikroskopie
- Rasterelektronenmikroskopie
- FIB/SEM
- Atomic Force Mikroskopie
- $\mu$ -CT
- Lichtmikroskopie

Im Jahr 2017 wurden die letzten von insgesamt 7 Forschungsgroßgeräten erfolgreich im Speziallabor für Mikroskopie integriert, installiert und zum größten Teil auch in Betrieb genommen.

Die sieben im Rahmen von FIT/BITS anschafften Großgeräte (siehe Instrumentelle Basis) zeigen bereits in großem Umfang ihr Potenzial und bilden einen wichtigen Bestandteil der Forschungsinfrastruktur, sowohl für die aktuellen als auch für die zukünftigen BITS/FIT Forschungsprojekte in der Materialwissenschaft der Universität Freiburg. Vergleichbare Mikroskopie-Zentren gibt es an den Universitäten Heidelberg, Karlsruhe (KIT), München, Bayreuth, Berlin etc. Mit den state-of-the-art Elektronenmikroskopen wird im Speziallabor Expertise für die Freiburger Materialforschung gesichert und lange Wege zu anderen Forschungsstandorten werden unnötig.

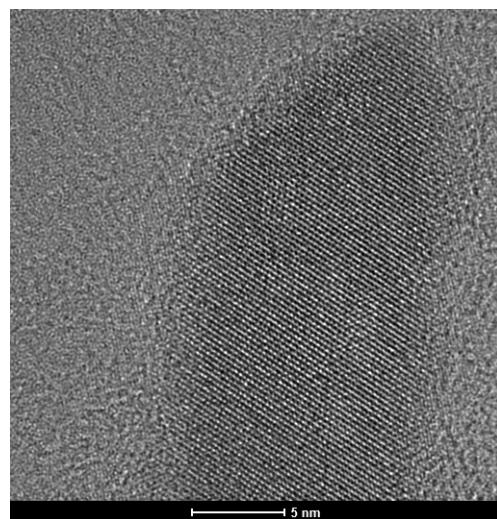


Abb. 2: HR-TEM (Talos F200X) Aufnahme, CeCdLi-Phosphat (© Thomann)

#### Ausstattung und Beispiele:

Das 200 kV TEM / STEM Gerät, **Talos F200X** ist eine atomar auflösende, Hochleistungsanlage. Mit X-FEG Emitter, Super-X EDX System, TEM und STEM mit umfangreicher Detektoraustattung, einer Hochleistungskamera, verschiedenen Probenhaltern für unterschiedliche Anwendungen und Tomographieaustattung ist es bestens für alle Fragestellungen die Hochauflösung (2D und 3D) und/oder Analytik brauchen geeignet.

Das kleinere **Talos L120C** ist ein robustes 120 kV TEM Gerät mit LaB<sub>6</sub>-Emitter. Neben Standardmessungen ist vor allem die Cryo Ausstattung u.a. mit speziellem Probenhalter und Vitrobot Vorbereitungsgerät hervorzuheben. Es ist komplett für die TEM Tilt-SerienTomographie ausgerüstet. Die hochwertige Ceta Kamera erlaubt sowohl hochwertige Bilder als auch hohen Durchsatz bei keiner Elektronendosis, und macht Tilt-(und Cryo-Tilt) Serien erst möglich.



Abb. 3: Das TEM Talos L120C im FIT (© Thomann)

Die FIB/SEM Anlage **Scios 2** ist ein Hochleistungs-SEM Gerät kombiniert mit einer Focused Ion Beam Säule und daher besonders gut geeignet für Schnittserien-Tomographie und für die Herstellung von TEM Lamellen. Das leistungsfähige EDX System ermöglicht Analytik aber auch elementspezifische Tomographie.

Die Hochdruckgefrieranlage Leica ICE mit EM AFS2 und EM FSP ist eine wichtige Peripherie-Anlage für die zerstörungsfreie Konservierung und Präparation wässriger Proben, so dass ihre Struktur im nativen, wässrigen Zustand mittels Elektronenmikroskopie untersucht werden kann. Im Vergleich zum Atmosphärendruck-Vitrobot ermöglicht es die Hochdrucktechnik (200 MPa) wasserhaltige

Probe mit größerer Volumen (bis zu einer Dicke von etwa 150 µm) zu vitrifizieren. Dies ermöglicht insbesondere die Untersuchung von a) biologischer Proben und b) technisch funktionale Materialien wie, z.B. aus einer Polymerelektrolytbrennstoffzelle. Nach der anschließende halbautomatische Färbe- und Einbettung liegt die Probe in mikrotomierbarer Form vor. Sie kann sowohl direkt vermessen werden, als auch die Grundlage für die Tomographie bilden.

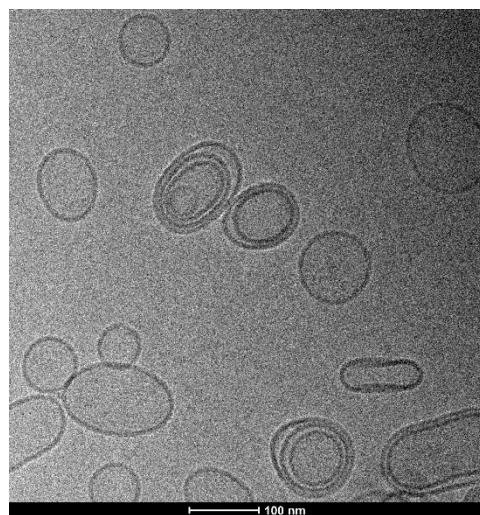


Abb. 4: Beispiel: Cryo TEM, Liposome, gemessen am Talos L120C im FIT (© Thomann/Barnert)

#### Instrumentelle Basis:

##### 200 kV TEM/STEM: Talos F200X:

- X-FEG High-brightness Emitter
- Super-X Super-Fast EDX System
- HR-STEM (HAADF, BF, DF)
- Tomography for TEM, STEM und EDX
- Cryo-Tomography
- idpc, ddpc
- Piezo-Stage 20pm
- Low-Dose
- Double Tilt Holder
- Resolution < 0.1 nm
- Ceta 16 Megapixel Digital Camera

**120 kV TEM: Talos L120C G2:**

- LaB6 cathode
- tomography equipment
- cryo TEM
- cryo-tomography
- Low-Dose

**FIB/SEM Anlage - Scios2 HiVac:**

- 30 kV
- Gallium-ion-column
- SE, T1, T2 and DBS Detectors
- C and Platin deposition
- Tomography equipment
- 70mm<sup>2</sup> EDX System
- EDX
- Mikromanipulator
- Preparation of TEM Lamella



Abb. 5: FIB/SEM Anlage Scios 2 im FIT (© Thomann)

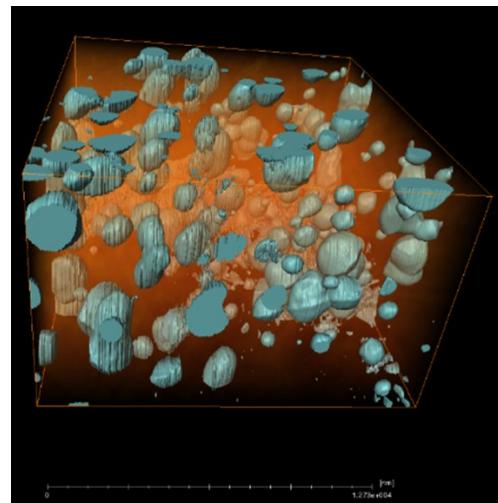


Abb. 6: 3D Rekonstruktion (Tomographie) einer FIB/SEM Schnittserie eines Edelstahls (Legierung), erstellt am Scios 2 im FIT (© Thomann)

 **$\mu$ -ct Anlage (Röntgentomographie):  
SkyScan 1272:**

- X-ray source: 20-100kV, 10W, <5  $\mu$ m spot size @ 4W
- X-ray detector: 16Mp, 14-bit cooled CCD fiber-optically coupled to scintillator
- Maximum object size 75mm in diameter using offset scan (27mm in fast single scan)
- Detail detectability 0.35  $\mu$ m (16Mp) at highest magnification
- Reconstruction Hierarchical (InstaRecon®) and multithreaded CPU/GPU 3D reconstruction

**AFM MultiMode Nanoscope 8:**

- Kontakt Mode
- Tapping Mode
- Nano indentation
- Nano scratch test
- PeakForce Tapping
- PeakForce QNM
- AFM für Messungen an Luft
- vertikale Auflösung von weniger als 0,05 nm möglich,
- laterale Auflösung von weniger als 5 Angström möglich laterale Scanweite bis 170  $\mu$ m möglich

**Konfokales 3D-Einzelphotonenfluoreszenz  
LSM: MicroTime 200**

- Messmodi: FLIM, FRET, FCS. etc.
- Single Photon Counting Modi (SPAD);  
  50 µm, 100 µm
- TTTR Datenaquisition

**Hochdruckgefrieranlage –  
LEICA ICE AFS2 FSP:**

- Vitrifizierung von wässrigen Proben bei einem Druck von 200 MPa
- Automatische Prozessführung
- Gefriersubstitution
- Automatische Dosierung und Einbettung
- Lichtstimulation



Abb. 7: Hochdruckgefrieranlage Leica ICE im FIT (links Leica EM AFS2), (© Thomann)

**Aktivitäten:**

Aufbau eines Speziallabors, Anschaffung von 7 Großgeräten inklusive deren Peripherie und Installation. Im Anschluss fanden mehrere geräte- und anwendungsspezifische Workshop/Trainings-Einheiten statt. Diese behandelten speziellen Themen, die sowohl für die in EM spezialisierten Mitarbeiter aus der Core Facility als auch für EM erfahrene Wissenschaftler aus andere BITS/FIT-Forschungsgruppen essenziell sind.

**Core Facility "Imaging of Materials Systems"**

**Network of competence 3D visualization with specialized laboratory for microscopy and tomography**

Scientific head: Prof. Dr. Rolf Mülhaupt

Responsible manager: Dr. Yi Thomann

<sup>1</sup>Institute for Macromolecular Chemistry, University of Freiburg, <sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

**Direction of Work:**

Material science microscopy with focus on tomography

- High Resolution Transmission Electron Microscopy
- Cryo Electron Microscopy
- Scanning Electron Microscopy
- FIB/SEM
- Atomic Force Microscopy
- µ-CT
- Light Microscopy

In 2017, the last of a total of 7 major research microscopes was successfully integrated and installed in the special laboratory for microscopy.

The seven new research microscopes and periphery devices (see equipment details) are already demonstrating their potential and are building an important research infrastructure for both, current and future BITS / FIT research works. The specialized lab will deliver competent works in the modern electron microscopy area and makes measurements for researcher in other similar core facilities such as in the universities of Heidelberg, Karlsruhe (KIT), Munich, Bayreuth, Berlin etc. not necessary anymore.

### **Equipment and Research Examples:**

The 200 kV TEM / STEM instrument, Talos F200X, is an atomically resolving, state-of-the-art high-performance system. With X-FEG emitter, Super-X EDX system, TEM and STEM with extensive detector equipment, a high-performance camera, different sample holders for different applications and tomography equipment, it is ideally suited for all high resolution (2D and 3D) and / or analytic needs.

The smaller Talos L120C is a practical 120 kV TEM device with LaB6 emitter. In addition to standard measurements, it has a Cryo equipment with special sample holder and Vitrobot preparation device and it is fully equipped for the TEM Tilt Series Tomography. The high-quality Ceta camera allows both high-quality images and high throughput with low electron doses, and makes tilt (and cryo-tilt) series for tomography possible.

The FIB/SEM system Scios 2 is a high-performance SEM device combined with a Focused Ion Beam column and therefore particularly well suited for slice serial tomography and for the production of TEM lamellae. The powerful EDX system allows analytics as well as element-specific tomography.

The Leica ICE high-pressure freezer with EM AFS2 and EM FSP is an important peripheral device for the non-destructive preservation and preparation of aqueous samples, in a way that their structure can be investigated in the as-native, aqueous state by means of electron microscopy. Compared to the atmospheric pressure Vitrobot, the high-pressure technique (200 MPa) allows vitrification of water-containing samples with larger volumes (up to a thickness of about 150 µm). This allows in particular the study of a) biological samples and b) technically functional materials such as e.g. from a polymer electrolyte fuel cell. After the subsequent semi-automatic dyeing and embedding, the sample is in a microtomable form. It can be measured directly as well as form the basis for tomography.

### **Equipment Details:**

#### **200 kV TEM/STEM: Talos F200X:**

- X-FEG High-brightness Emitter
- Super-X Super Fast EDX System
- HR-STEM (HAADF, BF, DF)
- Tomography for TEM, STEM und EDX
- Cryo-Tomography
- idpc, ddpc
- Piezo-Stage 20pm
- Low-Dose
- Double Tilt Holder
- Resolution < 0.1 nm
- Ceta 16 Megapixel Digital Camera

#### **120 kV TEM: Talos L120C G2:**

- LaB6 cathode
- tomography equipment
- cryo TEM
- cryo-tomography
- Low-Dose

#### **FIB/SEM Anlage - Scios2:**

- 30 kV
- Gallium-ion-column
- SE, T1, T2 and DBS Detectors
- C and Platin deposition
- Tomography equipment
- 70mm<sup>2</sup> EDX System
- EDX
- Micromanipulator
- Preparation of TEM Lamella

#### **µ-ct Anlage (X-ray Tomography): SkyScan 1272:**

- X-ray source: 20-100kV, 10W, <5 µm spot size @ 4W
- X-ray detector: 16Mp, 14-bit cooled CCD fiber-optically coupled to scintillator
- Maximum object size 75mm in diameter using offset scan (27mm in fast single scan)
- Detail detectability 0.35 µm (16Mp) at highest magnification

**AFM MultiMode Nanoscope 8:**

- Contact Mode
- Tapping Mode
- Nano indentation
- Nano scratch test
- PeakForce Tapping
- PeakForce QNM
- vertical resolution of less than 0.05 nm possible,
- lateral resolution of less than 5 angstroms possible
- lateral scan width up to 170µm possible

**Confocal 3D-single-photon-fluorescence microscope LSM: MicroTime 200**

- FLIM, FRET, FCS. etc.
- Single Photon Counting Modi (SPAD); 50 µm, 100 µm
- TTR data aquisition

**High Pressure Freezer - LEICA ICE AFS2 FSP:**

- Vitrification of aqueous samples at a pressure of 200 MPa
- Automatic process
- freeze substitution
- Automatic dosing and embedding
- Light stimulation

**Activities:**

Development of a special laboratory, and installation of several large microscopes. It was followed by a series of specialized workshops / trainings. These addressed specific topics that are essential for both the Core Facility staff and EM experienced scientists from other BITS / FIT research groups.

Fig. 1: The Talos F200X HR-TEM in the FIT (© Thomann)

Fig. 2: HR-TEM (Talos F200X) uptake, CeCdLi phosphate (© Thomann)

Fig. 3: The TEM Talos L120C in the FIT (© Thomann)

Fig. 4: Example: Cryo TEM, liposomes, measured on the Talos L120C in FIT (© Thomann / Barnert)

Fig. 5: FIB / SEM system Scios 2 in the FIT (© Thomann)

Fig. 6: 3D reconstruction (tomography) of a FIB / SEM section series of a stainless steel (alloy), created at the Scios 2 in the FIT (© Thomann)

Fig. 7: Leica ICE high pressure freezer in the FIT (left Leica EM AFS2), (© Thomann)

## Core Facility "Fertigungstechnik"

**Fertigungstechnik für bioinspirierte Materialien mit Schwerpunkten auf Nano-lithografie-, Folien- und 3D-Druck-Technologien**

Wissenschaftlicher Leiter:  
Prof. Dr. Claas Müller<sup>1,2</sup>  
Verantwortliche Managerin:  
Dr. Jing Becker<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FIT Core Facility "Functional Processing",  
<sup>2</sup>IMTEK Department of Microsystem Engineering,  
Laboratory for Process Technology

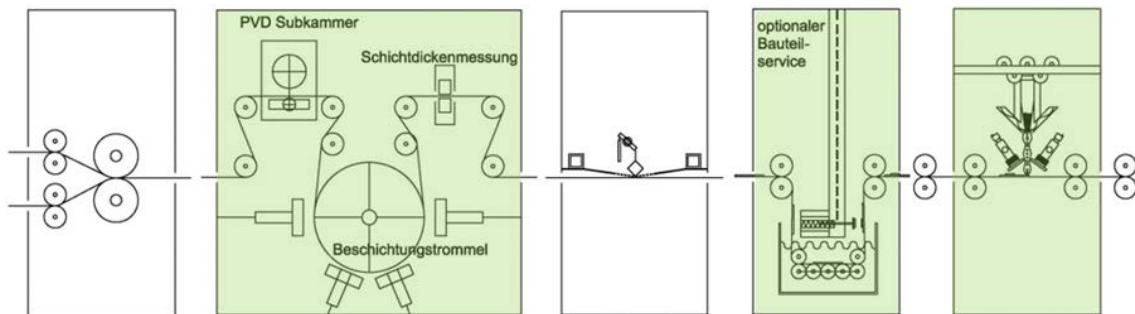


Abb. 1: Folientechnikum mit den Modulen (von links) Rollenlaminator, PVD & PECVD Beschichtung, Siebdrucker, Elektrophoretische Abscheidung und Aerosolprinter. © Core Facility 2, FIT, Freiburg

### Kurzbeschreibung mit Forschungszielen:

Ziel des Folientechnikums ist der Aufbau einer neuen Plattform für Hochdurchsatzexperimente und zur Herstellung neuartiger funktionaler und intelligenter / anpassungsfähiger Folien für den zukünftigen Einsatz in biochemischen, diagnostischen, bioinspirierten z.B. Energy Harvesting Systemen und mikrooptischen Sensorsystemen.

Die Technologieplattform 2 konzentriert sich insbesondere auf die Herstellung von Nano- und Mikrostrukturen auf makromolekularen Folien. Neben der Nanoimprintlithographie werden unterschiedliche neuartige Fertigungstechnologien, wie Lamination, Dünnenschichtabscheidung, Oberflächenmodifizierung, Aerosol-Jet-Drucktechnologie, elektrophoretische Abscheidung und Siebdrucktechnologie für spezielle Anwendungen auf Polymerfolien entwickelt.

### Roll-Embossing & Lamination: Stork Laminator HRL 350 Jumbo

Der Rollen Laminator HRL 350 Jumbo der Firma Stork hat zwei Anwendungsmodi. Zum einen kann er als Roll-Embossing Tool eingesetzt werden. Mit heizbaren und strukturierten

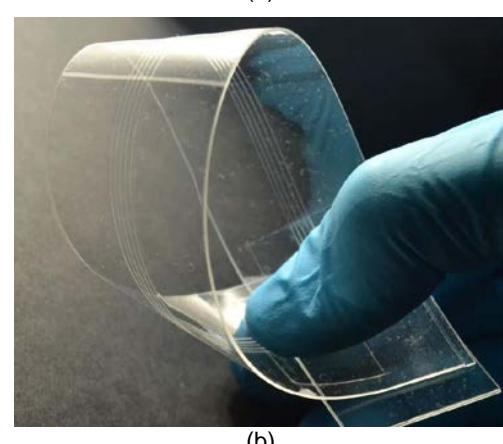


Abb. 2: (a) Stork Laminator HRL 350 Jumbo, © Core Facility 2, FIT, Freiburg, und (b) Reaktionslamination der COC-Welleneleiterfasern in PMMA. © Laboratory for Process Technology, IMTEK, Uni. Freiburg

Walzen können Nano- oder Mikrostrukturen direkt in Folien übertragen werden, um gezielt optische, mechanische oder auch mikrofluidische Funktionen zu realisieren. Zum anderen ist das Gerät als Folienlaminator einsetzbar, z. B. zur Deckelung von mikrofluidischen Strukturen zu Bauteilen aus unterschiedlichsten Materialien.

#### **Ganzflächige Schichtabscheidung, inkl. Behandlung:** Plasma Electronic Porta 400

Mit dem PVD Anlage können Folien auf der Oberfläche spezifisch modifiziert werden, um erweiterte Funktionen wie Benetzungsfähigkeit, Permeabilität, Kratzfestigkeit aber auch Schutz vor oder Nutzen von elektromagnetischen Kräften zu erzielen. Unterschiedliche Beschichtungen mit Metallen, Oxiden, Carbiden, Nitriden, DLC (Diamond-like carbon) usw. können mit dem PVD-Verfahren angeboten werden.



Abb. 3: Plasma Electronic Porta 400. © Core Facility 2, FIT, Freiburg

#### **Elektrophoretische Funktionsschichtabscheidung:** Permatecs Lösemittelbank in EX Ausführung

Die Elektrophorese beruht auf dem Prinzip, dass in einer Flüssigkeit gelöste oder suspenzierte kolloidale Partikel unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes auf einer Elektrode abgeschieden werden. Unterschiedliche Schichten, wie Halar, PEEK, PPS, Biopolymere, bioaktive Nanopartikel, CNTs (Carbon nanotube), Proteine, und Keramiken (piezoaktive bzw. funktionale Schichten) können durch EPD-Verfahren hergestellt werden.

Verglichen mit anderen Partikelverarbeitungsverfahren, ist Elektrophoretische Funktionschichtabscheidung in der Lage, gleichmäßige Beschichtungen mit hoher mikrostrukturerer Homogenität auf dreidimensionalen Substraten zu erzeugen. Dabei können Schichtdicken in einer definierten Stärke hergestellt werden. Um ein vollständig dichte und gut haftende Schicht zu erhalten, werden die Polymerschichten aufgeschmolzen bzw. die keramischen Schichten (vergleichbar mit einem Pulverpressling) entbindert und anschließend gesintert.



(a)



(b)

Abb. 4: (a) Permatecs EPD Anlage, © Core Facility 2, FIT, Freiburg und (b) Halar- beschichtet chirurgische Pinzette. © Laboratory for Process Technology, IMTEK, Uni Freiburg

#### **Aerosol Jet Druck:** Neotech AMT AJ 15XA Print System

Bei diesem Aerosol Druckverfahren handelt es sich um ein hoch-präzises, digitales und direktschreibendes, sowie kontaktloses Verfahren, um unterschiedliche funktionale Materialien, wie beispielsweise Metalle, Polymere (p- und n-leitende Polymere), Nanopartikel (Metalle, Keramiken) kleine Moleküle und Metalloxide mit Strukturauflösungen von wenigen

Mikrometern Linienbreite positioniert abscheiden. Neotech Aerosol Jet Drucktechnologie basiert auf drei Schlüsselmodulen: „Motion 3D“ Werkzeugweg-Erzeugungssoftware, 5-Achsen-CNC-Bewegungsplattform und der Jet-Druck-Motor von Firma Optomec.

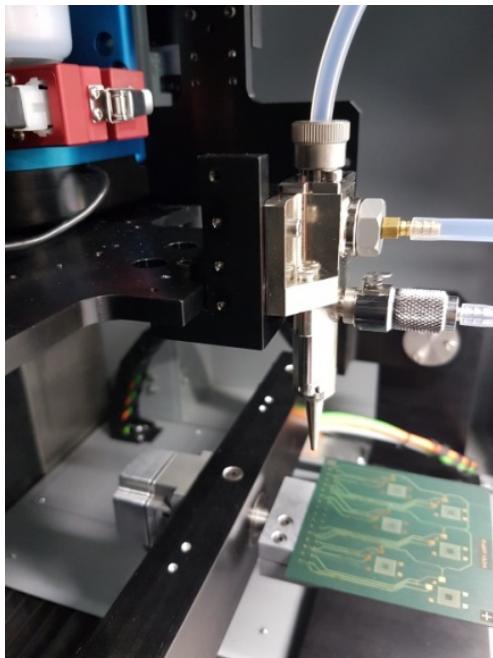


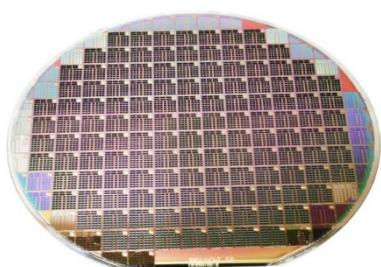
Abb. 5: Neotech AMT AJ 15XA Aerosol Jet Druck Anlage. © Core Facility 2, FIT, Freiburg

#### **Mikrosiebdruckanlage:** Thieme Siebdruckanlage LAB 1000

Thieme lab 1000 ist eine Präzisionssiebdruckmaschine (Toleranz von  $\pm 15 \mu\text{m}$ ) mit automatischer Siebausrichtung und automatischer Substratausrichtung mittels CCD- Kamerasytens. Die Siebdruckmaschine hat vielfältige Anwendungen von z.B. gedruckte Elektronik, Solarzellen, RFID und organische Elektronik. Mit dem Siebdrucker können unterschiedliche Materialien z. B. Polymere bzw. Metalltinten verdruckt werden.



(a)



(b)

Abb. 6: (a) Thieme Siebdruckanlage LAB 1000, © Core Facility 2, FIT, Freiburg, und (b) Siebgedruckt PEM Brennstoffzellen. © Laboratory for Process Technology, IMTEK, Uni. Freiburg

**Aktivitäten:** Die Prozessen und die entwickelten Prozessketten können den FIT-Mitgliedern als Dienstleistung angeboten werden.

## Core Facility "Functional Processing"

**Manufacturing technique for bioinspired materials with focus on nanolithography, film technology, and generative processes**

Scientific head: Prof. Dr. Claas Müller<sup>1,2</sup>  
Responsible manager: Dr. Jing Becker<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FIT Core Facility "Functional Processing",  
<sup>2</sup>IMTEK Department of Microsystem Engineering,  
Laboratory for Process Technology

**Short description of research goals:** In order to support the research projects running in FIT, a powerful technology department, Core Facility 2, is established for functional design and efficient manufacturing of (micro-) systems and adaptive bioinspired materials.

Core Facility 2 concentrates particularly on the fabrication of nano- and micro-structures on macromolecular foils. Besides nanolithography technology, various novel manufacturing technologies, such as roll lamination, thin film deposition, surface modification, aerosol jet printing technology, electrophoretic deposition, as well as screen printing technology are developed for special applications on polymer foils.

**Roll-embossing & Lamination system:**  
Stork roll laminator HRL 350 Jumbo

The Stork roll laminator in this module has two functionalities. On the one hand, it can be used as a roll-embossing device. With heatable and structured rollers, nano- or microstructures can directly transferred into polymer foils in order to obtain specific optical, mechanical, microfluidic or electronic functions. On the other hand, the device can be used as a foil laminator. For example, it can be used to seal micro features (e.g. microfluidic channels) with a polymer cover foil.

**Thin film deposition/ Surface modification:**  
Plasma Electronic Porta 400

Physical vapour deposition (PVD) module is used for thin film deposition and surface modification. The Porta 400 is a system which multiple processes, such as polymer cleaning, surface activation, surface modification, as well as thin film deposition, are executed in one chamber. Various polymer surface characteristics, such as wettability, water/ gas permeability, wear resistant properties could be altered in a desirable way. Simultaneously, different kinds of thin films, such as metal, oxide, carbide, nitride and DLC (diamond-like carbon) could be deposited on the polymer surface in this module.

**Electrophoretic deposition:** Permatecs EPD system

In this electrophoretic deposition module, in liquid dissolved or suspended colloidal particles can deposit on an electrode under the influence of electric field. Various layers, such as Halar, PEEK, PPS, biopolymers, bioactive nanoparticles, carbon nanotubes (CNTs), biological entities (e.g. proteins), and ceramics (e.g. piezoactive or functional layers) can be prepared by EPD methods.

Compared with other particle processing methods, EPD process is able to produce uniform coatings with high microstructural homogeneity on substrates with three-dimensional shape with sufficient controlling of the layer thickness. In order to obtain dense coatings with high adhesion to the substrates, polymer or ceramic layers which are prepared by the EPD process (comparable to powder compacts) have to be melted or debinded, and finally sintered in the following thermal treatment process.

**Aerosol Jet Druck:** Neotech AMT AJ 15XA print system

Aerosol Jet Printing is a maskless, non-contact material deposition process. In this module, a wide range of functional materials, such as metals, polymers (p- and n-type conductive polymers) nanoparticles (metal or ceramic),

oxides, and biologic materials could be deposited on 3D substrate surface with high resolution. Neotech's Aerosol Jet printing technology is based on the combination of three key modules: motion 3D tool-path generation software, 5 axis CNC motion platform and Optomec's Aerosol Jet Print Engine. This Aerosol Jet printer is capable of printing the features with the smallest width in the range of 10 µm.

**Screen printing system:** Thieme screen printer LAB 1000

Thieme lab 1000 is a high precision screen printing machine (tolerance of  $\pm 15 \mu\text{m}$ ) with automatic screen alignment and automatic substrate alignment by using CCD camera systems. The screen printing machine has various applications of e.g. printed electronics, solar cells, RFID and organic electronics. Different screen printing inks which contain polymers, metal and ceramic materials could be applied in this module.

**Activities:** Core Facility 2 would like to support the Fit members in finding the perfect solution for their individual applications with our strong technology background and our process chains.

Fig. 1: Arrangement of the process modules in the Core Facility 2 (from left): roll laminator, PVD & PECVD system, screen printer, electrophoretic deposition system and aerosol jet printer. © Core Facility 2, FIT, Freiburg

Fig. 2: (a) Stork roll laminator HRL 350 Jumbo, © Core Facility 2, FIT, Freiburg, and (b) COC waveguide fibers laminated in PMMA foils. © Laboratory for Process Technology, IMTEK, Uni. Freiburg

Fig. 3: Plasma Electronic Porta 400. © Core Facility 2, FIT, Freiburg

Fig. 4: (a) Permatecs EPD system, © Core Facility 2, FIT, Freiburg, and (b) Halar coated surgical forceps. © Laboratory for Process Technology, IMTEK, Uni. Freiburg

Fig. 5: Neotech AMT AJ 15XA Aerosol Jet printer. © Core Facility 2, FIT, Freiburg

Fig. 6: (a) Thieme screen printer LAB 1000, © Core Facility 2, FIT, Freiburg, and (b) screen printed PEM fuel cell. © Laboratory for Process Technology, IMTEK, Uni. Freiburg

## Core Facility "Modelling and Simulation of Materials Systems"

### Konzeptentwicklung, Modellierung und Simulation interaktiver Materialien

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr. Michael Moseler<sup>1,2</sup>

Verantwortlicher Manager:

PD Dr. Michael Walter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Physikalisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,<sup>2</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Die Materialentwicklung und Systemintegration werden im FIT durch Modellierung und Simulation unterstützt. Die von der Landesstiftung und der Deutschen Forschungsgemeinschaft bewilligten Mittel aus dem BITS-Projekt wurden inzwischen für eine Erweiterung des in Freiburg beheimateten NEMO-Clusters genutzt, an dem sich das FIT im „shareholder“-Prinzip beteiligt. Durch Synergieeffekte konnten 1000 zusätzliche Kerne beschafft werden (daher ca. 20% mehr als beantragt) was einem Anteil von ca. 5.6% des erweiterten Clusters entspricht. Außerdem war es möglich die Rechenkapazitäten schon vor dieser Erweiterung zu nutzen, wovon auch ausgiebig Gebrauch gemacht wurde. Wie Abb. 1 zeigt, standen damit 11% der Rechenleistung des gesamten NEMO-Clusters dem FIT zur Verfügung um aktuelle Themen in der Tribologie, der Polymerchemie, der organischen Photovoltaik, der Katalyse bis hin zur Modellierung von Materialien aus nachwachenden Rohstoffen in der Simulation zu untersuchen.

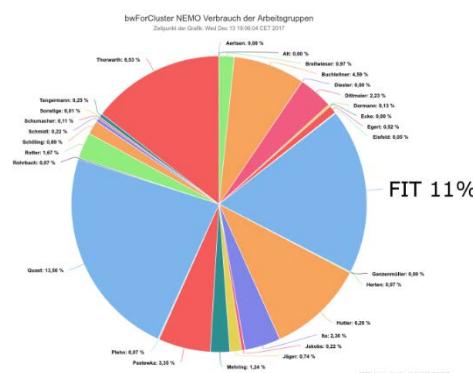


Abb. 1: Anteil der vom FIT genutzten Rechenzeit am gesamten NEMO-Cluster im Jahr 2017

## Core Facility "Modellierung und Simulation von Materialsystemen"

### Concept development, modelling and simulation of interactive materials

Scientific head:

Prof. Dr. Michael Moseler<sup>1,2</sup>

Responsible manager:

PD Dr. Michael Walter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics, University of Freiburg,<sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

FIT supports materials development and system integration through modelling and simulation. The funding granted by the Landesstiftung and the German Research Foundation for this purpose was used for an extension of the NEMO-cluster located at the University of Freiburg, where FIT participates in a “shareholder” principle. Due to synergy-effects additional 1000 cores (therefore approx. 20% more than were granted) were included to the cluster, which corresponds to a 5.6% of the full extended cluster. The “shareholder”-status allowed to use the computational resources already before this extension, a possibility that was used extensively by the simulation group of FIT. As shown in fig. 1, the actual use of the computational resources summed up to 11% of the full NEMO-Cluster. These calculations allowed addressing current problems in tribology, polymer chemistry, organic photovoltaics and catalysis in simulation as well as modelling of materials based on natural resources.

Fig. 1: Partition of computational time used on the full NEMO-cluster in the year 2017. The fraction used by FIT is highlighted.

## LEITUNG / MANAGEMENT

Prof. Dr. Rolf Mülhaupt  
(Geschäftsführender Direktor)  
Fakultät für Chemie, Pharmazie u. Geowissenschaften  
Leiter des Instituts für Makromolekulare Chemie

Prof. Dr. Thomas Speck  
(Stellvertretender Geschäftsführender Direktor)  
Fakultät für Biologie  
Direktor des Botanischen Gartens

Dr. Stefanie Meisen  
(Verwaltungsleiterin)  
FIT

Dr. Olga Speck  
(Wissenschaftliche Koordinatorin)  
FIT

## DIREKTORIUM / DIRECTORATE

Das Direktorium des Zentrums besteht aus fünf hauptberuflich tätigen Professor/inn/en aus den beteiligten Fakultäten der Albert-Ludwigs-Universität, die Mitglieder des Zentrums sein müssen. Diese werden auf Vorschlag der Mitgliederversammlung vom Rektorat auf drei Jahre bestellt. Das Direktorium wählt den/die Geschäftsführende/n Direktor/in. Das Rektorat bestellt den/die Geschäftsführende/n Direktor/in ebenfalls auf drei Jahre. Das Direktorium ist für die Führung der Geschäfte verantwortlich und entscheidet in allen Angelegenheiten, die nicht einem anderen Organ der Universität zugewiesen sind. Es koordiniert die im Rahmen des Zentrums durchzuführenden Aufgaben und erstellt einen jährlichen Forschungs- und Finanzierungsplan. Mitglieder des Direktoriums sind:

Prof. Dr. Rolf Mülhaupt  
(Geschäftsführender Direktor)  
Fakultät für Chemie und Pharmazie  
Leiter des Instituts für Makromolekulare Chemie

Prof. Dr. Thomas Speck  
(Stellvertretender Geschäftsführender Direktor)  
Fakultät für Biologie  
Direktor des Botanischen Gartens

Prof. Dr. Günter Reiter  
Fakultät für Mathematik und Physik

Prof. Marie-Pierre Laborie, Ph.D.  
Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Prof. Dr. Peter Woias  
Technische Fakultät

## MITGLIEDER / MEMBERS

Für die Mitglieder werden zeitlich befristet Projektlabore mit der entsprechenden Infrastruktur zur Verfügung gestellt. Gleichzeitig werden drei Technologieplattformen dauerhaft installiert. Im Jahr 2016 waren 18 wissenschaftliche Mitglieder der Albert-Ludwigs-Universität und des Universitätsklinikums im FIT aktiv.

Prof. Dr. Jan C. Behrends (Medizinische Fakultät)

Prof. Dr. Stefan Glunz (Technische Fakultät)

Dr. Volker Knecht (Fakultät für Mathematik und Physik)

Prof. Dr. Ingo Krossing (Fakultät für Chemie und Pharmazie)

Prof. Marie-Pierre Laborie, Ph.D. (Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen)

Dr. Karen Lienkamp (Technische Fakultät)

Dr. Tom Masselter (Fakultät für Biologie)

Prof. Dr. Michael Moseler (Fakultät für Mathematik und Physik)

Prof. Dr. Rolf Mülhaupt (Fakultät für Chemie und Pharmazie)

Prof. Dr. Günter Reiter (Fakultät für Mathematik und Physik)

Prof. Dr. Ralf Reski (Fakultät für Biologie)

Jun.-Prof. Dr. Winfried Römer (Fakultät für Biologie)

Prof. Dr. Jürgen Rühe (Technische Fakultät)

Dr. Michael Sommer (Fakultät für Chemie und Pharmazie)

Dr. Olga Speck (Fakultät für Biologie)  
Prof. Dr. Thomas Speck (Fakultät für Biologie)  
Dr. Simon Thiele (Technische Fakultät)  
Prof. Dr. Andreas Walther (Fakultät für Chemie und Pharmazie)  
Prof. Dr. Peter Woias (Technische Fakultät)  
Prof. Dr. Roland Zengerle (Technische Fakultät)

## WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT / ADVISORY BOARD

Der Beirat begleitet die wissenschaftlichen Arbeiten des Zentrums. Er soll dem Direktorium Anregungen für die weitere Entwicklung des Zentrums geben. Beiräte können externe Hochschullehrer/innen werden, deren Forschungsschwerpunkte im Tätigkeitsgebiet des Zentrums liegen. Diese werden vom Direktorium für fünf Jahre bestellt.

Sprecher / Spokesperson:  
Prof. Dr. Ingo Burgert (ETH Zürich, Schweiz)  
Stellvertretende Sprecherin / Deputy spokesperson:  
Dr. Karine Anselme (Institut de Science des Materiaux de Mulhouse (IS2M), Frankreich)  
Prof. Dr. Eduard Arzt (Universität des Saarlandes und Leibniz Institut für Neue Materialien)  
Prof. Dr. Clothilde Boulanger (Université de Lorraine, Frankreich)  
Prof. Dr. Christoph Neinhuis (TU Dresden)  
Prof. Dr. Oskar Paris (Montanuniversität Leoben, Österreich)  
Prof. Dr. Thomas Scheibel (Universität Bayreuth)

## INTERNES BERATUNGSGREMIUM / INTEGRATIVE BOARD

Das Integrative Board wird als universitätsinternes Beratungsgremium eingerichtet und begleitet die Entwicklung des FIT. Es wirkt auf

den Interessenausgleich der am FIT inhaltlich beteiligten Fakultäten und Einrichtungen hin.

Prof. Dr. Rolf Mülhaupt (Geschäftsführender Direktor des FIT)

Prof. Dr. Thomas Speck (Stellvertretender Geschäftsführender Direktor des FIT)

Prof. Dr. Tim Freytag (Dekan der Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen)

Prof. Dr. Bettina Warscheid (Dekanin der Fakultät für Biologie)

Prof. Dr. Kerstin Krieglstein (Dekanin der Medizinischen Fakultät)

Prof. Dr. Gregor Herten (Dekan der Fakultät für Mathematik und Physik)

Prof. Dr. Manfred Jung (Dekan der Fakultät für Chemie und Pharmazie)

Prof. Dr. Oliver Paul (Dekan der Technischen Fakultät)

Prof. Dr. Eberhard Schockenhoff (Geschäftsführender Direktor des Interdisziplinären Ethikzentrums)

Dr. Bruno Ehmann (Leiter Freiburg Research Services)

Dr. Stefanie Meisen (Verwaltungsleiterin des FIT)

Prof. Dr. Ingo Burgert (Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats)

## ZAHLEN UND FINANZEN

2017 konnte die Anzahl der Projekte am FIT auf 26 gesteigert werden. Das Ausgabevolumen stieg auf 5,5 Mio € an. Einen großen Anteil daran hatten die Großgeräte-Anschaffungen, die auf Grund der Teilfinanzierung durch die DFG und BW-Stiftung getätigten werden konnten. Der Anteil der Drittmittel lag deshalb dieses Jahr nur bei 26% und die Investitionsausgaben waren mit 70% der größte Brocken bei den Ausgaben. Gefolgt von 28% Personalkosten und einem geringen Aufwand an Sachkosten. Dieses Ungleichgewicht wird sich sicherlich im laufenden Jahr 2018 nicht erneut ergeben. Durch die Auflagen, die sich aus der Gemeinnützigkeit des Gebäudes ergeben,

können nur entsprechende Projekte eingeworben werden. Wir sind gespannt, wie sich der Haushalt entsprechend weiter entwickelt.

Offiziell verfügt das FIT lediglich über zwei etatisierte Stellen: Die Verwaltungsleitung mit 25% und eine Assistenz mit 100%. Aus diesem Grunde erfolgt die Betreuung der Core Facilitys über Projektmittel. Hier stehen momentan drei Leitungsstellen und eine Technikstelle zur Verfügung. Über die Sicherung und Nachhaltigkeit der Stellen und weiterer etatisierter Stellen wird momentan verhandelt.

So langsam füllt sich das Gebäude und bei einer Steigerung der Projekte fällt automatisch

eine Steigerung der Mitglieder und auch der MitarbeiterInnen an. Im Berichtsjahr waren es 134 MitarbeiterInnen, davon 57 Promovierende, 23 Postdocs, 12 MasterstudentInnen und 3 BachelorstudentInnen. Sie Alle tragen das FIT mit seiner Grundidee intelligente Systeme und interaktive Funktionsmaterialien zu entwickeln, die sich am Vorbild der Natur orientieren und füllen das Gebäude mit Leben.

Statistiken sagen oft nichts über die gelebte Kultur aus, sind jedoch wegweisend für Trends und Entwicklung, weshalb wir nicht auf sie verzichten können. Deshalb finden Sie im Anschluss die wichtigsten Statistiken aus dem FIT.

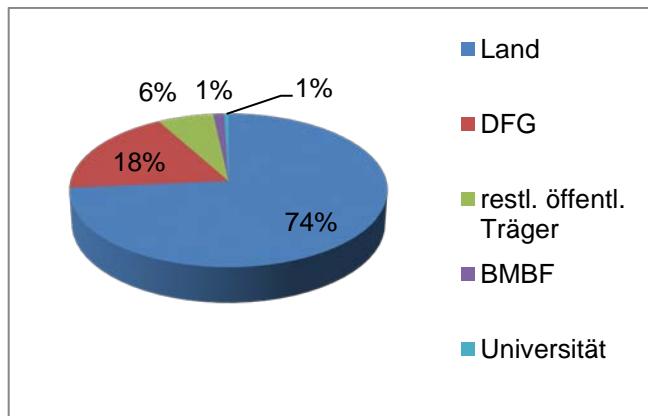


Abb. 1: Gesamtbudget prozentual

	2015	2016	2017
<b>Universität (Innovationsfond)</b>	0	18.457	0
<b>Universität (Haushalt)</b>	1.600	13.698	24.184
<b>Land</b>	1.437.617	2.468.606	4.048.018
<b>DFG</b>	714.700	874.430	1.007.218
<b>BMBF</b>	0	0	69.121
<b>Sonstige öffentliche Träger</b>	470.058	202.420	353.471
<b>Gesamt</b>	<b>2.623.975</b>	<b>3.577.611</b>	<b>5.502.012</b>

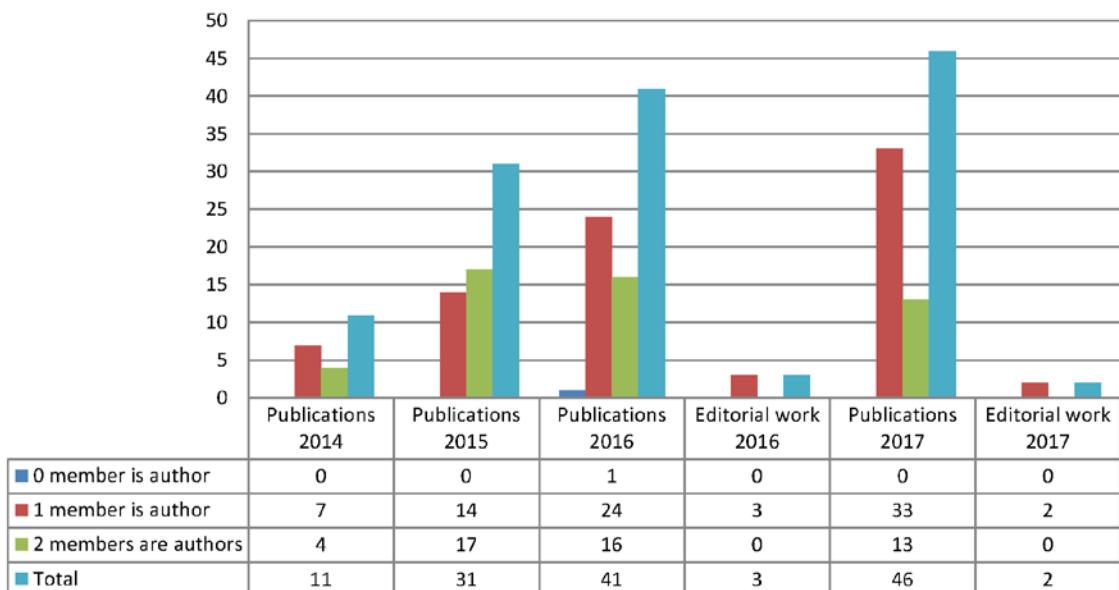
Tab. 1: Gesamtbudget FIT (Ausgaben in €)

Projektleitung	Projekt	Gesamtprojekt	Verausgabt
<b>Behrends</b>	IRTG-SoMaS	131.100	46.262
	BITS	200.955	200.955
<b>Glunz</b>	OPosSIT	142.200	18.490
<b>Krossing</b>	Anschubfinanzierung	30.000	26.117
<b>Laborie</b>	LignoSit	234.000	55.712
<b>Lienkamp</b>	ANTIBUG	1.174.040	69.121
	ERC-Grant	1.498.988	288.416
<b>Masselter</b>	SFB TRR 141 A06	239.300	90.000
<b>Mülhaupt</b>	BITS	5.295.000	3.765.234
	IRTG-SoMaS	233.700	88.680
<b>Reiter</b>	SFB TRR 141 A08	163.365	45.105
	IRTG-SoMaS	3.722.074	148.937
<b>Reski</b>	SFB TRR 141 A09	219.200	59.990
<b>Römer</b>	IRTG-SoMaS	201.755	46.262
	Energetische Untersuchungen	168.155	54.535
<b>Rühe</b>	IRTG-SoMaS	228.000	93.852
<b>Speck, O.</b>	SFB TRR 141 A03	158.900	47.187
<b>Speck, T.</b>	SFB TRR 141 A02, A04, B01	524.000	166.285
	IRTG SoMaS	50.000	46.262
<b>Thiele</b>	Alexander von Humboldt	103.200	48.720
	Cluster BLBT	131.000	55.951
<b>Walter</b>	Kraftbereich	129.300	44.047
<b>Walther</b>	ERC-Grant	750.000	121.500

Tab. 2: Überblick über die Projekte am FIT für 2017

Projektgruppe	2015	2016	2017
<i>Mitglieder/members</i>			
<b>Behrends</b>	31.340	20.548	46.054
<b>Glunz</b>	0	0	18.490
<b>Krossing</b>	0	0	26.117
<b>Laborie</b>	59.868	59.868	55.712
<b>Lienkamp</b>	470.058	202.420	357.536
<b>Masselter</b>	73.640	67.780	90.000
<b>Mülhaupt</b>	92.007	745.017	4.054.850
<b>Reiter</b>	142.233	136.307	194.042
<b>Reski</b>	0	0	59.990
<b>Römer</b>	13.303	72.859	100.797
<b>Rühe</b>	73.585	86.074	93.852
<b>Speck, T.</b>	139.608	158.847	212.547
<b>Thiele</b>	0	18.457	62.672
<b>Walther</b>	0	0	121.500
<i>Leiter Core Facility &amp; assoz. Mitglieder / Heads of Core Facility &amp; assoc. members</i>			
<b>Speck, O.</b>	44.972	50.992	47.187
<b>Walter</b>	4.160	38.157	44.047

Tab. 3: Jahresvergleich der verausgabten Mittel



Tab. 4: FIT-Publikationen und Herausgeberschaften von 2014 bis 2017

## FIGURES AND FINANCES

In 2017 the number of projects at FIT was raised to 26. The issuing volume rose to 5.5 m €. To a big part this was due to the acquisition of large equipment that could be bought with the help of partial financing by the DFG and the BW foundation. Due to this, the proportion of third-party funds was only 26 % this year, whereas capital spending of 70 % was the largest chunk of the expenses, followed by 28 % of staff expenditure and a small expenditure of material costs. This kind of imbalance will certainly not arise again in the current year - 2018. Due to the regulations that result from the non-profit status of the building, only appropriate projects can be recruited. We are excited to see how the budget will develop in the future.

Officially, FIT has only two budgeted positions: The administration management (25 %) and an assistance for the administration management (100 %). Therefore, the Core Facilities are supervised via project funds. At the moment, there are three executive positions and one technical position for this task. The securing and sustaining of these and other budgeted positions is currently being negotiated.

With more and more projects in our building the number of members and employees is also rising. In the reporting year there were 134 employees, thereof 57 doctoral candidates, 23 postdocs, 12 master students, and 3 bachelor students. They all support FIT with its basic concept of developing intelligent systems and interactive functional materials that get their inspiration from nature and breathe life into the building.

Statistics often cannot illustrate the living culture but show the way for trends and developments and so we cannot do without them. Therefore you will find the most relevant statistics of FIT below.

Fig. 1: Total budget (proportionally)

Tab. 1: Total budget FIT (expenses in €)

Tab. 2: Overview of projects at FIT 2017

Tab. 3: Year-on-year comparison of the spent budget

Tab. 4: FIT-Publications and editorial work from 2014 until 2017

## HIGHLIGHTS

### ADAPTIVE POLYMERE WERKSTOFFE / ADAPTIVE POLYMER MATERIALS

#### **Quantitative Untersuchungen von Adhäsion und Reibung auf mikrostrukturierten Oberflächen: Inspiration von Insekt-Pflanze Interaktionen**

C. Kumar<sup>1,2,3</sup>, D. Favier<sup>2</sup>, T. Speck<sup>1,3</sup>, and V. Le Houérou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg, <sup>2</sup>Institut Charles Sadron (ICS), CNRS UPR022, Université de Strasbourg, Strasbourg, Frankreich, <sup>3</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – International Research Training Group (IRTG) „Weiche Materialien (GRK-1642): Von molekularen Kräften zu neuen Materialien“ – Projekt A5

Die Studie ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt basierend auf der Kooperation von Biologen/Biomechanikern der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg (PI: Prof. Dr. Thomas Speck) mit Polymer-Tribologen der Physics-Mechanics and Tribology of Polymers Group des Institut Charles Sadron der Universität Strasbourg, Frankreich (PI: Prof. Dr. Vincent Le Houérou).

Dieses interdisziplinäre Forschungsprojekt umfasst die Themenbereiche biologische Oberflächen, polymere Materialien und Kontaktmechanik. Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung der Grenzflächenkontaktmechanik (Adhäsion und Reibung) von replizierten mikrostrukturierten biologischen Oberflächen mit einem Modellsystem, das vom Haftpad (Arolium) der Stabheuschrecken (*Carausius sp.*) inspiriert ist. Adhäsions- und Reibungsphänomene treten in vielen vom Menschen geschaffenen technischen Systemen sowie in natürlichen Systemen auf und sind von großer Bedeutung für deren Funktionalität [1]. Grenzflächenphänomene haben folglich

einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und Effizienz technischer Systeme. Eine verbreitete Methode, diese Phänomene zu beeinflussen, besteht in der Mikrostrukturierung der Oberfläche (zusätzlich zur Veränderung der physikalisch-chemischen Eigenschaften) [2, 3]. Bei Pflanzen sind die Blattoberflächen mit einer arttypischen charakteristischen Oberflächenstrukturierung unterschiedlicher Strukturgröße und Form sowie verschiedenen Strukturierungs-Hierarchieebenen versehen [4]. Abgesehen von der vielfältigen Oberflächenstrukturierung besitzen Pflanzenblätter eine komplexe Materialzusammensetzung und eine über die Blattoberfläche variierte Oberflächenchemie, was Blattoberflächen zu komplizierten Systemen macht, deren Untersuchung neue Inspirationen für technische Umsetzungen verspricht. Die genaue Replikation der Oberflächenstrukturen von Pflanzenblättern auf ein elastisches Kunststoffmaterial bietet eine mögliche Lösung, um diese Systeme hinsichtlich der Einflussparameter zu vereinfachen. Dies erlaubt es die Rolle der Oberflächentopographie systematisch zu untersuchen, indem man den oberflächenchemischen Aspekt ausschließt. Zu Beginn dieses Projektes wurden drei verschiedene Modellpflanzenblätter für Untersuchungen ausgewählt: Juwelorchidee (*Ludisia discolor*) Abb. 1a, Parakautschukbaum (*Hevea brasiliensis*) Abb. 1b und Litschi (*Litchi chinensis*) Abb. 1c.

Oberflächenstrukturen von Blättern aller drei Pflanzenarten wurden durch eine zweistufige Replikationstechnik (Epoxy-PDMS) präzise auf das silikonbasierte, hochtransparente Polymer (Polydimethylsiloxan (PDMS)) übertragen [5]. Die entsprechenden Methoden und Ergebnisse wurden in den vorangegangenen FIT-Berichten ausführlich besprochen. Alle Oberflächenuntersuchungen (Analyse der Replikationsqualität und Untersuchung der Proben) wurden mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) und/oder konfokaler Laserscanning-Mikroskopie (CLSM) durchgeführt. Vor der Untersuchung der Kontaktmechanik wurden alle Proben (Replikate und glattes PDMS) über Nacht mit einer Lösung aus n-Heptan und 1-Dodecanethiol (0,01 %) behandelt, um die freien, nicht abreaktierten Ketten zu entfernen [6]. Da es sich bei dieser Behandlung um

## Highlights

eine Schwellung mit anschließender Entquellung der Proben handelte, wurden die Proben vor und nach der Behandlung mit einem REM-Mikroskop qualitätsgeprüft, wodurch bestätigt werden konnte, dass durch die Behandlung keine Oberflächenschäden verursacht wurden.

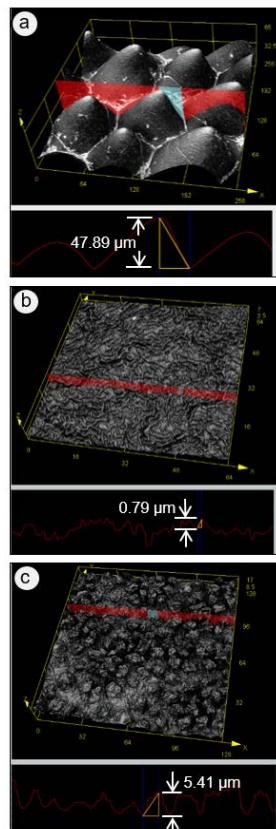


Abb. 1: Aufnahmen mit dem konfokalen Lasermikroskop (CLMS) der Pflanzenblattoberflächen. (a) *Ludisia discolor* (Blattoberseite; eher grobe konische Strukturierung, 50-80 µm), (b) *Hevea brasiliensis* (Blattoberseite; feine Mikrostrukturierung,  $\approx 1 \mu\text{m}$ ), and (c) *Litchi chinensis* (Blattunterseite; komplexe hierarchische Strukturierung). © Plant Biomechanics Group, Freiburg

Da dieses Projekt von den Wechselwirkungen zwischen Insekten und Pflanzen inspiriert ist, ist der Kraftbereich dieser Wechselwirkungen im Allgemeinen sehr klein und bewegt sich im Bereich von Mikro- bis Milli-Newton [7]. Aus diesem Grund erfordert diese Studie ein hochempfindliches Testverfahren, um in einem niedrigen Kraftbereich Grenzflächenphänomene quantitativ untersuchen zu können. Für die Adhäsionskraftuntersuchungen wurde ein Nano-Indenter/Kratzer (UNHT<sup>3</sup>, Anton Paar Tritec, Schweiz) zu einem JKR (Johnson,

Kendall und Roberts) Kontaktmechanik-basierten dynamischen Abzugskrafttestgerät mit hochauflösender Last- (10 nN) und Wegkontrolle modifiziert (Abb. 2). Dieses Testgerät wurde um eine einzigartige Funktion zur Aufzeichnung der in-situ Real-Kontakt-Visualisierung erweitert, das auf dem Prinzip der Durchlichtmikroskopie basiert [8]. Darüber hinaus wurde das Setup mit einem im Rahmen des Projekts entwickelten elektronischen System zur Echtzeitsynchronisation individueller Videobilder mit dem jeweils entsprechenden Adhäsionskraft-Datenwert weiterentwickelt. Dies ermöglicht eine genaue Analyse der Haftungs-Enthaftungs-Mechanik und – dank der einzigartigen Echtzeitsynchronisation – die präzise Bestimmung des obersten Kontaktpunktes (Oberflächenreferenzierung), welcher für weitergehende Berechnungen verwendet werden kann. Eine präzise Oberflächenreferenzierung ist wichtig für genaue und driftfreie Kraftmessungen insbesondere, wenn die beiden Körper, die sich berühren, aus weicher Materie bestehen [9].

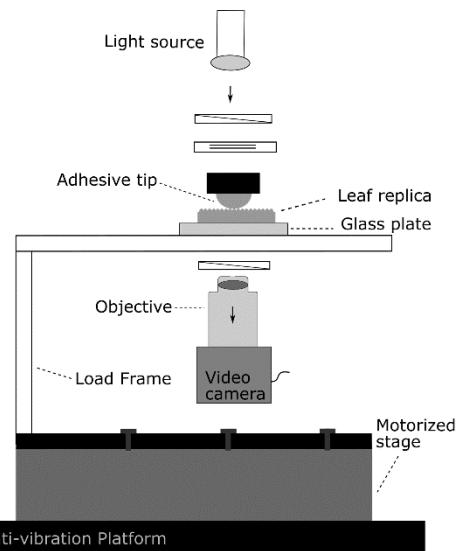


Abb. 2: Schematisch vereinfachte Darstellung des Abzugskrafttestgeräts mit hochauflösender Last- und Wegkontrolle (modifizierter Ultra-Nanoindenter) in Verbindung mit Echtzeit- und Real-Kontakt Kontrolle. © Institut Charles Sadron, Strasbourg.

Die Haftkraftprüfung erfolgt mit Hilfe einer Modellhaftspitze, die in Kontakt mit Substratoberflächen gebracht und mit konstanter Geschwindigkeit unter Lastkontrolle abgezogen wird. Während des Enthaftungsvorgangs

(Rückzugsteil) stellt der maximale negative Kraftwert die Abzugshaftkraft ( $F_{ad}$ ) dar, wie in Abb. 3a dargestellt. Um den Einfluss der Andruckkraft ( $F_L$ ) auf die Adhäsionskraft zu untersuchen, wurde  $F_L$  von 0,5 mN bis 3,5 mN mit einer Schrittweite von 1,0 mN variiert, wobei alle anderen Parameter konstant gehalten wurden. Wie aus Abb. 3a ersichtlich, scheint der  $F_{ad}$ -Wert für glatte PDMS unabhängig von Andruckkraft zu sein, was in guter Übereinstimmung mit der Theorie der Standardhaftungsmechanik [10] steht. Der Gesamtwert der Adhäsionskraft für glatte PDMS war höher ( $F_{ad} = 0,6$  mN) als bei mikrostrukturierten Oberflächen. Ebenso wurde keine Veränderung der Adhäsionskraft in Abhängigkeit von der Andruckkraft für die grob konisch mikrostrukturierten Oberflächenreplikaten von *L. discolor* festgestellt (Abb. 3b), während bei den fein mikrostrukturierten Oberflächenreplikaten von *H. brasiliensis* eine signifikante Zunahme der Adhäsionskraft mit Erhöhung der normalen Andruckkraft wurde (Abb. 3c). Die Zunahme der Adhäsionskraft kann durch den lediglich auftretenden Teilkontakt der Kontaktspitze mit feinen Oberflächenmikrostrukturen bei geringer Andruckkraft, im Gegensatz zur Vollkontaktebildung bei hoher Andruckkraft erklärt werden, was durch die realen in-situ Kontaktfächenaufnahmen bestätigt wird. Ein vergleichbares Verhalten mit geringer Variation wurde für die Oberflächenreplikate von *L. chinensis* mit komplexen hierarchischen Strukturen beobachtet (Abb. 3d).

Beim Vergleich der Werte der Abzugshaftkraft von allen vier Oberflächenreplikaten bei gleicher Andruckkraft wurden erhebliche Unterschiede beobachtet, wie aus Abb. 3 ersichtlich ist. Darüber hinaus ist es möglich die Dynamik der Haftung und der Enthaftung für jede Oberfläche dank der hochauflösenden in-situ realen Kontaktvisualisierung zu beobachten und mit dem jeweils entsprechenden Adhäsionskraft-Datenwert zu synchronisieren.

Weiterhin laufen Primärreibungsversuche (Lineargleitversuche) auf allen vier Oberflächen, um die Versuchsparameter und das Versuchsprotokoll zu finalisieren. Umfangreiche Reibungstests werden in Kürze beginnen, ebenso wie die umfassende Analyse und Kor-

relation von In-situ-Videos von den entsprechenden Tests. Parallel dazu wird eine numerische Modellierung von technischen Modelloberflächen, die von biologischen Strukturoberflächen inspiriert sind, mit Hilfe der Finite-Elemente-Analyse (MSC-Marc-Software) durchgeführt.

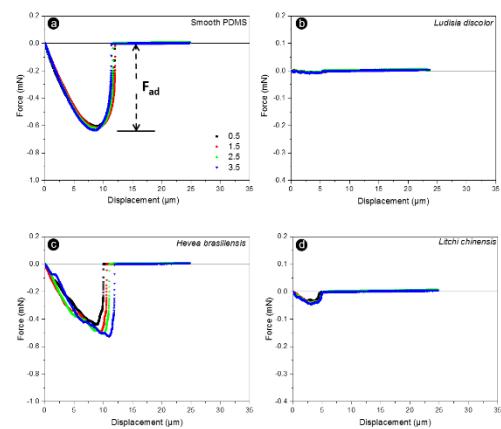


Abb. 3: Diagramme der Kraft-Weg-Kurven (nur der Rückzugsteil ist dargestellt) für alle vier getesteten Oberflächen dar: (a) glatte PDMS, (b) *L. discolor* Oberflächenreplikat, (c) *H. brasiliensis* Oberflächenreplikat und (d) *L. chinensis* Oberflächenreplikat. Die unterschiedlichen Kurven in jedem Diagramm zeigen den Einfluss von Schwankungen der normalen Vorspannung ( $F_L$ ) auf die Haftkraft des Abzuges ( $F_{ad}$ ), wobei alle anderen Parameter konstant gehalten werden.  
© Institut Charles Sadron, Strasbourg.

- [1] W. Barthlott, M. Mail, B. Bhushan & K. Koch, *Nano-Micro Letters* 9, 23 (2017).
- [2] C. Poulard, F. Restagno, R. Weil & L. Léger, *Soft Matter* 7, 2543–2551, (2011).
- [3] Z. Burton & B. Bhushan, *Nano Lett.* 5, 1607–1613, (2005).
- [4] K. Koch, B. Bhushan & W. Barthlott, *Soft Matter* 4, 1943–1963, (2008).
- [5] C. Kumar, V. L. Houérou, T. Speck & H. F. Bohn, *under review* (2017).
- [6] M. Deruelle, M. Tirrell, Y. Marciano, H. Hervet & L. Léger, *Faraday Discuss.* 98, 55–65, (1994).
- [7] P. Drechsler & W. Federle, *J Comp Physiol A* 192, 1213–1222, (2006).
- [8] E. Salmon & P. Tran, *Methods in cell biology* 81, 335–364, (2007).
- [9] D. M. Ebenstein & L. A. Pruitt, *Nano Today* 1, 26–33, (2006).
- [10] K. Johnson, K. Kendall & A. Roberts, in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society 324, 301–313, (1971).

## Quantitative Investigations of Adhesion and Friction on Micro-Textured Surfaces: Inspiration from Insect-Plant Interactions

C. Kumar<sup>1, 2, 3</sup>, D. Favier<sup>2</sup>, T. Speck<sup>1, 3</sup>, and V. Le Houérou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg, <sup>2</sup>Institut Charles Sadron (ICS), CNRS UPR022, Université de Strasbourg, Strasbourg, France, <sup>3</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

Project funding: German Research Foundation (DFG) – International Research Training Group (IRTG) “Soft Matter Science (GRK-1642): Concepts for the Design of Functional Materials” – Project A5

The project A5 represents a highly interdisciplinary research project based on the bi-national joint collaboration of biologists/biomechanics of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg (PI: Prof. Dr. Thomas Speck) with polymer tribologists of the Physics-Mechanics and Tribology of Polymers Group from the Institut Charles Sadron, University of Strasbourg, France (PI: Prof. Dr. Vincent Le Houérou).

This interdisciplinary project covers biological surfaces, polymeric materials and contact mechanics. The main focus is on the investigation of interfacial contact mechanics (adhesion and friction) of bio-replicated micro-structured biological surfaces using a model system inspired by the adhesive pad (Arolium) of the stick insect (*Carausius spec.*). Adhesion and friction phenomena occur in many man-made technical systems as well as in natural ones and are of great importance for their functionality [1]. These interfacial phenomena thus have a significant influence on the durability and efficiency of technical systems. A well-recognised method of influencing these phenomena is the micro-structuring of the surface (apart from the modification the physico-chemical properties) [2, 3]. In plants the leaf surfaces show a characteristic and species-specific surface structuring including structures with different size, distinct shape and various level of hierarchy [4]. Apart from diverse surface structuring, plants leaves have a complex material composition and non-uniform surface chemistry, making leaf surfaces complicated systems

whose investigation promises new inspiration for technical implementations. The precise replication of the surface structures of plants leaf onto the soft matter polymer offers a possible solution to simplify these systems in terms of influencing parameters. This allows to investigate systematically the role of surface topography excluding the surface chemistry aspect. At the beginning of this project, three different model plants leaves were selected for investigations: Jewel Orchid (*Ludisia discolor*) Fig. 1a, Rubber tree (*Hevea brasiliensis*) Fig. 1b, and Lychee (*Litchi chinensis*) Fig. 1c.

Surface structures from leaves of all three plant species were precisely replicated onto the silicone-based, highly transparent polymer (Polydimethylsiloxane (PDMS)) by a two-step (Epoxy-PDMS) replication technique [5]. The corresponding method and results are discussed in detail in previous FIT-reports. All surface analyses for replication quality analysis and examination of the samples were performed using scanning electron microscopy (SEM) and/or confocal laser scanning microscopy (CLSM) techniques. Prior to contact mechanics investigations, all samples (replicas and smooth PDMS) were treated with a solution of n-heptane and 1-dodecanethiol (0.01 %) for overnight, to remove the free unreacted chains [6]. Since this treatment included swelling and then de-swelling of samples, therefore, the samples were – before and after treatment – quality-examined using a SEM microscope, confirming no surface damage were caused by the treatment.

Since this project is inspired by the interactions between insects and plants, the force range of these interactions is generally very small and ranges from  $\mu\text{N}$  to  $\text{mN}$  [7]. Therefore, this study requires a highly sensitive testing method in order to investigate quantitatively interfacial surface phenomena in a low force range. For the adhesion force investigations, a nano-indenter/scratcher (UNHT<sup>3</sup>, Anton Paar Tritec, Switzerland) was modified into a JKR (Johnson, Kendall and Roberts) contact mechanics based dynamic pull-off force tester, with high-resolution load (10 nN) and displacement control (Fig. 2). This test device has been extended by a unique function for recording the in-situ real-contact visualization, based

on the principle of transmitted light microscopy [8]. In addition, the setup was equipped with an electronic system developed within the framework of the project for real-time synchronisation of individual video images with the corresponding adhesion force data values. This allows for an accurate analysis of the attachment-detachment mechanics and - thanks to the unique real-time synchronization - the precise determination of the top contact point (surface referencing), which can be used for further calculations. Precise surface referencing is important for accurate and drift-free force measurements, especially when the two bodies that come into contact with each other are made up of soft matter [9].

The adhesion test is performed with a model adhesive tip brought in contact with substrate surfaces and retracted at a constant rate under load-control. During the unloading cycle (retraction part) the maximum negative force value represents the pull-off adhesion force ( $F_{ad}$ ), as marked in Fig. 3a. To investigate the effect of normal pre-load ( $F_L$ ) on adhesion force,  $F_L$  was varied from 0.5 mN to 3.5 mN with a step size of 1.0 mN, by keeping all other parameters constant. As can be seen from Fig. 3a, the  $F_{ad}$  value for smooth PDMS appears to be independent of normal pre-load, which is in good agreement with standard adhesion mechanics theory [10]. The overall adhesion force value for smooth PDMS was found to be higher ( $F_{ad} = 0.6$  mN) as compared to micro-structured surfaces. Likewise, no variation in adhesion force was recorded for the coarse conical micro-structured surface replicas of *L. discolor* (Fig. 3b), whereas in case of the fine micro-structured surface replicas of *H. brasiliensis* a significant increase in adhesion force was observed when increasing the normal pre-load (Fig. 3c). The increase in adhesion force can be explained by the only partial contact on the contact tip with fine surface microstructures at low pre-load, in contrast to the full contact formation at high pre-load, which is confirmed by the in-situ real contact images. A similar behaviour with little variation was recorded for the surface replicas of *L. chinensis* with complex hierarchical structures (Fig. 3d).

A comparison of the pull-off adhesive force values for the four surface replicas measured at the same normal pre-load proved substantial differences, as can be seen in Fig. 3. In addition, the attachment-detachment dynamics can be analysed for each surface, thanks to the real-time synchronisation of individual video images with the corresponding adhesion force data values.

Furtheron, primary friction (linear sliding) tests on all four surfaces types are on-going in order to finalise the test parameters and the experimental protocol. Extensive friction tests will begin soon, along with comprehensive analysis and correlating of in-situ videos with respective tests. In parallel, numerical modelling will be performed on technical model surfaces, which are inspired from biological structured surfaces, using finite element analysis (MSC-Marc software).

Fig. 4: Confocal laser scanning microscope (CLSM) images of original plant leaf surfaces. (a) *Ludisia discolor* (upper leaf surfaces; coarse conical patterns, 50- 80  $\mu$ m), (b) *Hevea brasiliensis* (upper leaf surface; fine microstructures,  $\approx 1$   $\mu$ m), and (c) *Litchi chinensis* (lower leaf surface; complex hierarchical structures). © Plant Biomechanics Group, Freiburg

Fig. 5: Simplified drawing of the dynamic pull-off force tester (modified ultra-nanoindenter) with high-resolution load and displacement control coupled with real-time real-contact visualization. © Institut Charles Sadron, Strasbourg.

Fig. 6: Graphs representing the force-displacement curve (only the retraction part is shown) for all four tested surfaces: (a) smooth PDMS, (b) *L. discolor* surface replica, (c) *H. brasiliensis* surface replica, and (d) *L. chinensis* surface replica. Different curves in each graph show the effect of variations of the normal pre-load ( $F_L$ ) on the pull-off adhesion force ( $F_{ad}$ ), keeping all other parameters constant. © Institut Charles Sadron, Strasbourg.

## Kinetically driven structure formation in quasi-two dimensional systems

A. Das<sup>1,2</sup>, R. Reiter<sup>1,2</sup> and G. Reiter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Experimental Polymer Physics, Freiburg, <sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bio-inspired Technologies (FIT)

Project Funding: German Research Foundation (DFG) - International Research Training Group (IRTG) "Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials" - Project: C4

The Langmuir technique has been used to study chain conformation [1-2], visco-elastic properties [3-4], and crystallization [5-7] of polymers in quasi-two dimensional (quasi-2D) systems. Phase transitions in Langmuir films can be induced by varying the concentration of polymer molecules at the air/water interface [5-7]. Structural transitions associated with different phase transitions, in particular first order phase transitions, are an integral step to get an insight in the ordering processes of polymer thin films under confinement. Moreover, first order phase transitions are related to processes of nucleation and growth of ordered structures as for example crystals. In this context, our work aims at identifying first order phase transitions in Langmuir polymer films and the morphological changes associated with such transitions.

The Langmuir technique, which enables the formation of mono-molecular layers of polymer molecules at the air/water interface, was used to study the morphological evolution (correlated with phase transitions) of poly L-lactic acid (PLLA) at the air/water interface. Furthermore, preparation conditions (temperature, compression rate) of the Langmuir films were varied systematically to attain a deeper understanding into the kinetics of structure formation processes of the Langmuir polymer films of PLLA. The morphological studies of the Langmuir polymer films were performed *ex-situ* by Atomic Force Microscopy (AFM) after transferring the films onto silicon substrates using the Langmuir-Schaefer method. In this work, we have used PLLA because it can crystallize and it can also form a monolayer at the air/water interface [5]. PLLA with a low molecular weight (1800 g/mol, i.e., 24

monomer units) was used in this study in order to avoid chain folding during the ordering process.

A two-dimensional phase diagram of PLLA at the air/water interface can be obtained by measuring the surface pressure ( $\Pi$ ), which is the two-dimensional analog of hydrostatic pressure, as a function of the mean area occupied by each molecule ( $A$ ), the two-dimensional analog of volume. Changes in slope in the isotherm often indicate phase transitions in the system. The 2D analogs of bulk compressibility and bulk elastic modulus can also be obtained through the derivation of the  $\Pi$ - $A$  isotherm with respect to changes in area per molecule (see equation (1)) which give information on the mechanical properties of the films.

$$\varepsilon_S = C^{-1} = -A \frac{\delta \Pi}{\delta A} \quad (1)$$

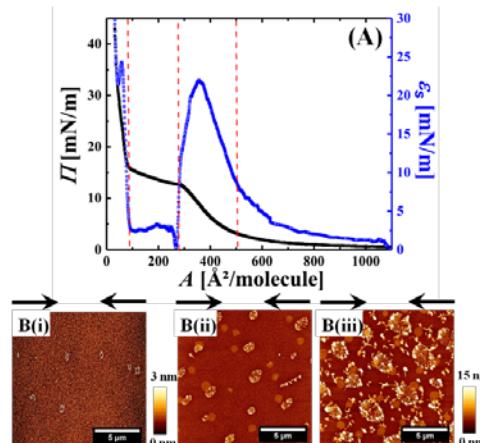


Fig. 1: (A) The surface pressure ( $\Pi$ ) – area ( $A$ ) isotherm of PLLA at the air/water interface at a compression rate of  $48 \text{ \AA}^2/(\text{molecule} \cdot \text{min})$  at a constant temperature of  $20^\circ\text{C}$ . The right y-axis shows the plot of the static elastic modulus ( $\varepsilon_S$ ) as a function of the mean area occupied by each molecule ( $A$ ). (B) AFM images of the films transferred at a mean area of (i)  $360 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$ , (ii)  $288 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$ , and (iii)  $190 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$ . © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Figure (1(A)) shows the surface pressure ( $\Pi$ ) - area ( $A$ ) isotherm of PLLA compressed at a rate of  $48 \text{ \AA}^2/(\text{molecule} \cdot \text{min})$  at a constant temperature of  $20^\circ\text{C}$ . The static elastic modulus is shown on the right y-axis. From the obtained isotherm, three distinct changes in

slope can be identified (indicated by the red dashed lines in the figure). Interestingly, a sudden drop in elastic modulus, coupled with the onset of a plateau-like region in the isotherm, can be observed in figure 1(A) at an area of  $300 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$ , which indicates a first order phase transition in the film. In order to understand the morphological changes associated with the phase transition we transferred films compressed to areas before and after the onset of the plateau. The corresponding AFM images from these transferred films show a film consisting of homogeneously distributed aggregates of nanoscopic size (Figure 1(B) (i)). Interestingly, transferred films compressed to an area within the plateau revealed the appearance of mesoscopic clusters (Figure 1(B) (ii-iii)). From a detailed analysis from many AFM images resulting from these transferred films, two distinct morphological features can be identified: (i) mesoscopic clusters ( $MC$ ) separated by a well-defined interface from the surrounding, (ii) smaller nanoscopic aggregates ( $NA$ ) which were surrounding the mesoscopic clusters. The existence of two different morphological features hints to the co-existence of two phases within the plateau of the isotherm. Furthermore, the area covered by the mesoscopic clusters increased with increasing the surface concentration, indicating a process of nucleation (initiated at the onset of the plateau region) and subsequent growth.

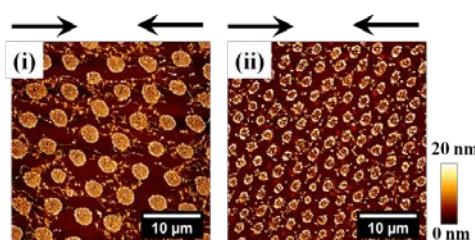


Fig. 2: AFM images of the films transferred at an area of  $190 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$  for a compression rates of (i)  $35 \text{ \AA}^2/(\text{molecule}\cdot\text{min})$  and (ii)  $77 \text{ \AA}^2/(\text{molecule}\cdot\text{min})$ . © Experimental Polymer Physics, Freiburg.

Figure 2 clearly shows that the nucleation density of these morphological objects strongly depends on experimental parameters. It is of fundamental interest to control the nucleation density and therefore a systematic study on its

dependence on the experimental protocol was performed.

Keeping the surface density/concentration of polymer molecules at the air/water interface constant, the rate of compression was varied from  $8 \text{ \AA}^2/(\text{molecule}\cdot\text{min})$  to  $270 \text{ \AA}^2/(\text{molecule}\cdot\text{min})$  and determined the resulting nucleation density observed in the transferred films. From the AFM images, (shown in figure 2) it is evident that with increasing compression rate the size of the mesoscopic clusters decreased, accompanied by an increase of the nucleation density of these structures.

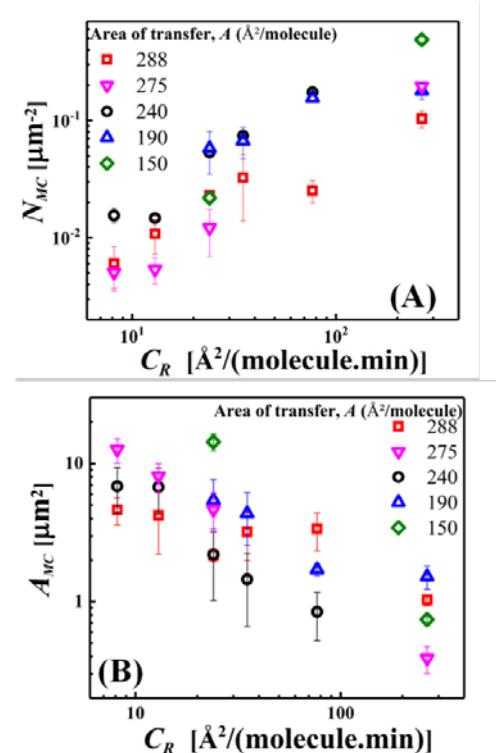


Fig. 3: (A) Nucleation density of the mesoscopic clusters ( $N_{MC}$ ) at a constant area per molecule ( $A$ ) as a function of the compression rate ( $C_R$ ). (B) Average size of the mesoscopic clusters ( $A_{MC}$ ) at a constant area per molecule ( $A$ ) as function of the compression rate ( $C_R$ ). Results are presented for different surface densities as indicated by the different symbols. © Experimental Polymer Physics, Freiburg.

Figure 3 (A) shows a graphical representation of the nucleation density ( $N_{MC}$ ) as a function of the rate of compression ( $C_R$ ) for constant surface densities ( $A$ ). Figure 3 (B) depicts the average area ( $A_{MC}$ ) of the mesoscopic clusters as a function of ( $C_R$ ). Figure 3 (A) reveals that the nucleation density can be increased by

more than an order of magnitude by increasing the compression rate. This implies that nucleation of mesoscopic clusters is indeed controlled kinetically.

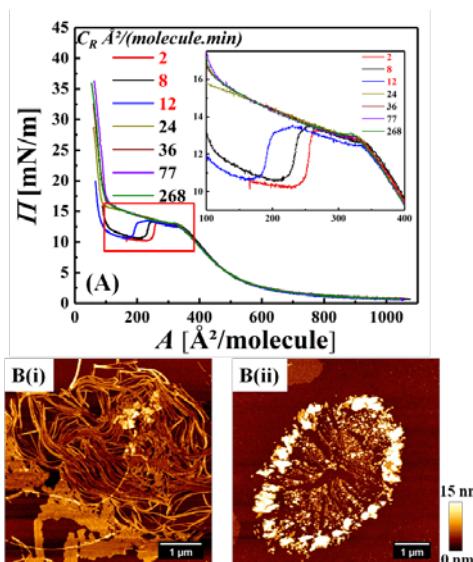


Fig. 4: (A) The surface pressure ( $\Pi$ ) – area ( $A$ ) isotherms obtained for different compression rates. (B) AFM images of the films transferred at an area of  $150 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$  compressed at rates of (i)  $8 \text{ \AA}^2/(\text{molecule} \cdot \text{min})$  and (ii)  $24 \text{ \AA}^2/(\text{molecule} \cdot \text{min})$ . © Experimental Polymer Physics, Freiburg.

Surprisingly, significant differences in the isotherms were observed, in particular when the films were compressed at rates less than  $24 \text{ \AA}^2/(\text{molecule} \cdot \text{min})$ . During compression, a decay of  $\Pi$  (of approximately  $2.5 \text{ mN/m}$ ) was observed (figure 4(A)), which may signify structural changes in the films obtained at slow compression rates. After detailed analysis of the transferred films (transferred at an area of  $150 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$ ), we can clearly identify differences in morphology for the two ranges of compression rates. At high compression rates (Fig. 4 B (ii)) mesoscopic clusters are formed, whereas the morphology obtained through very slow compression (Fig. 4 B(i)) was dominated by domains consisting of fibers.

The width of the fibers varied from  $15 \text{ nm}$  to  $40 \text{ nm}$  and the height of the fibers varied from  $5 \text{ nm} - 8 \text{ nm}$ . In addition to the fiber-like structures, we have also observed flat platelet like structures in the films compressed at low compression rates. Interestingly the height of the

platelet like structures was  $6.5 \text{ nm}$ , consistent with the length of a fully extended polymer chain (approximately  $6.4 \text{ nm}$ ). From this observation one might speculate that fully extended PLLA molecules could form flat platelet-like regions, which might be crystalline.

The time elapsing during the total preparation process of the Langmuir films was shown to have strong impact on the observed morphological details of the films. Previous studies have already shown that non-equilibrated states can manifest in Langmuir polymer films during compression due to the hindrance of the structural relaxation of long polymer chains [8]. Furthermore, it has been reported that the morphological features and the nucleation density obtained in thin films of isotactic-polystyrene (iPS) can be tuned tremendously by tuning the time allowed for equilibration of the spin-coated thin films [9]. By decreasing the rate of compression, we are increasing the time allowed for the polymer molecules to re-organize (time of equilibration) at the air/water interface. We can anticipate that the system will form more stable structures (fibers and flat platelet like structures) when the films are compressed at slow compression rates. Based on this assumption, we expect that the clusters formed in the films compressed at higher compression rates are meta-stable in nature and may evolve into more stable structures if we allow the films to equilibrate over time.

In conclusion, we were able to demonstrate in this study that the rate of compression is a significant factor in determining the nucleation density and the morphological features obtained in quasi 2D systems. Further studies are in progress to understand the nature (meta-stable/stable/unstable) of the formed clusters and to identify the mechanisms responsible for the dependence of nucleation density on the rate of compression.

[1] Sugihara. K., Kumaki. J., *J. Phys. Chem. B* 116, 6561–6568 (2012)

[2] Kumaki. J., *Polymer Journal*, 48, 3-14 (2016)

[3] Spigone. E., Cho. G., Fuller. G. G., Cicuta. P., *Langmuir*, 25, 13, 7457–7464 (2009)

- [4] Monroy. F., Arriaga. L. R., Langevin. D., *Phys. Chem. Chem. Phys.* 14, 14450–14459 (2012)
- [5] Ni. S., Lee. W., Li. B., Esker R. A., *Langmuir* 22, 3672–3677 (2006)
- [6] Li, B., Marand, H. and Esker, A. R., *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.* 45, 3200–3318 (2007)
- [7] Naolou. T., Busse. K., Lechner. B. Kressler. J., *Colloid. Polym. Sci.* 292, 1199–1208 (2014)
- [8] Chandran. S., Dold. S., Buvignier. A., Krannig. K., Schlaad. H., Reiter. G., Reiter. R., *Langmuir* 31, 6426–6435 (2015)
- [9] Poudel. P., Chandran. S., Majumder. S., Reiter. G., *Macromol. Chem. Phys.* 1700315 (2017)

## BIOMIMETISCHE UND BIOBASIERTE MATERIALIEN / BIOMIMETIC AND BIO-BASED MATERIALS

### DNA Protozellen und Hierarchische Materialien durch das Surfen von Energielandschaften

Remi Merindol<sup>1,2</sup>, Andreas Walther<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>A<sup>3</sup>BMS Lab, Institut für Makromolekulare Chemie, Stefan Meier Straße 31, 79104 Freiburg, <sup>2</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektförderung: ERC Grant - TimeProSaMat

Die Vertiefung der Komplexität und Funktionalität selbst-assemblierender Strukturen stützt sich auf einen zunehmenden Wechsel hin zu Multikomponentensystemen, die in nicht-trivialen Wechselwirkungen miteinander netzwerken. Um hierarchische Architekturen mit emergenten funktionalen Eigenschaften aufzubauen ist beispielsweise das Ausnutzen gelegentlicher Zeit-, Kraft, und Längenskalen entscheidend.

In der Welt der DNA-basierten Strukturen hat es vortreffliche Entwicklungen zu hochgradig definierten nanoskaligen Strukturen (Origamis) gegeben. Da die Strukturierung solcher Materialien jedoch nur auf nanoskaligen Bau-

steinen und der klassischen supramolekularen Duplexbildung beruht sind auch die finalen Strukturen in der Ausdehnung auf die Nanoskala begrenzt und letztendlich durch die Bausteindimensionen und den Strukturbildungsprozess bestimmt.

Komplementär zu dieser supramolekularen Strukturierung (Duplex) auf der Nanoskala haben wir nun entdeckt, dass auch der Polymercharakter der DNA zur Strukturbildung aktiviert werden kann und zu Strukturierungseffekten auf der Mesoskala führt. So zeigt sich in Abhängigkeit der DNA Sequenz, dass bestimmte DNA Einzelstränge beim Erhöhen der Temperatur einen Phasenübergang (löslich/unlöslich) zeigen, und ähnlich wie Poly(N-isopropylacrylamid) (PNIPAM, das wohl bekannteste, synthetische, thermo-responsive Polymer) kolloidale Objekte bilden. Der physikalische Ursprung dieses Prozesses liegt in einer temperatur-induzierten Desolvatation, die spezifisch für selektierte Nucleobasen ist, und sich somit durch die Nukleotidsequenz programmieren lässt. Diese zusätzliche Längenskala ermöglicht es, komplett DNA-basierte hierarchisch strukturierte, komplexe Kolloide templatfrei und auf einfache Weise durch einen trivialen Temperaturrampenprozess herzustellen. Ein großer Beitrag zum Erfolg in diesem Projekt war die saubere Synthese von Sequenz-kontrollierten DNA Multi-blockcopolymeren und das genau Studium von deren thermoresponsivem Verhalten.

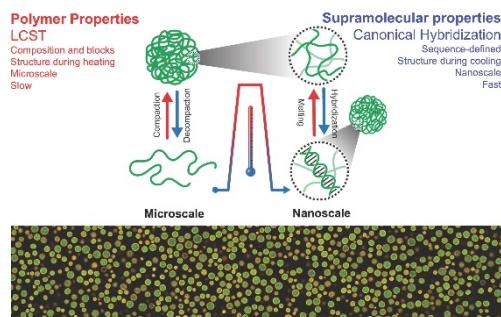


Abb. 1: Antagonistische Phasen-separation (Polymercharakter) und DNA Duplexbildung (supramolekularer Charakter) erlauben komplexe Mikropartikelarchitekturen über kinetische Kontrolle. © Walther

## Highlights

Der Schlüssel zum Erfolg in den selbstassemblierenden Systemen liegt im Management der Energiedlandschaft um definierte metastabile Zustände über den Prozessweg einzufangen (Abb. 1) [1]. So stehen die beiden Effekte antagonistisch gegenüber: Die klassische Duplexbildung erfolgt schnell auf der Nanoskala und beim Abkühlen, wohingegen die LCST-Phasensegregation langsam auf der Mikroskala und beim Aufheizen abläuft. Aus dem Konzert beider Prozesse lassen sich beim Abkühlen komplexe hierarchische Morphologien durch Duplexhybridisierung kinetisch kontrolliert einfangen. Ein besonderes Highlight sind DNA Protozellen (bestehend aus zwei verschiedenen Sequenz-definierten DNA Multiblockcopolymeren), welche am Ende des Heizprozesses eine flüssige ssDNA Lösung als genetische Information unter hohem osmotischen Druck in einer Hydrogelschale aus dsDNA einschließen. Der Prozess für deren Herstellung dauert keine 10 Minuten und eine vielfältige Funktionalisierbarkeit ist gegeben. Durch den Einbau von thermoplastischen Gold-Nanopartikeln gelingt es zum Beispiel diese Protozellen, räumlich und zeitlich kontrolliert, selektiv in der Schale zu erhitzen und somit die DNA Information aus dem Kern freizusetzen. Weiterführend lassen sich zelluläre Hydrogele erschaffen, die interessantes mechano-adaptives Verhalten zeigen.

Aus der fundamental neuen Erkenntnis des LCST Verhaltens von Einzelstrang-DNA ergibt sich in Kombination mit der klassischen antagonistischen Duplexhybridisierung eine vollkommen neue Art komplett DNA basierte hierarchische Materialien über vorher nicht zugängliche Längenskalen aufzubauen. Spannend ist die weiterführende Frage, ob eine solche Wärme-induzierte Kompartimentierung zur Selektion genetischer Information in späteren Prozessen an der Origin-of-life Grenzfläche eine Rolle gespielt haben könnte.

[1] R. Merindol, S. Loescher, A. Walther „Pathway-Controlled Formation of Mesostructured all-DNA Colloids and Superstructures“ in review.

## DNA Protocells and Hierarchical Materials based on Surfing Energy Landscapes

Remi Merindol<sup>1,2</sup>, Andreas Walther<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>A<sup>3</sup>BMS Lab, Institute for Macromolecular Chemistry, Stefan Meier Straße 31, 79104 Freiburg, <sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired technologies

Project funding: ERC Grant - TimeProSaMat

Increasing the complexity and functionality of self-assembling structures relies on a shift towards multicomponent systems that network with non-trivial interactions. For example, balancing opposing time, force, and length scales is crucial to build hierarchical architectures with emergent functional properties.

In the world of DNA-based assemblies, there have been exciting developments towards highly defined nanoscale structures (origami). However, since the structuring of such materials is based only on nanoscale building blocks via the classical supramolecular duplex formation, the final structures are limited in their dimensions to the nanoscale, hence, they are ultimately determined by the building block dimensions and the structure formation process.

Complementary to this nanoscale supramolecular structuring (duplex), we recently discovered that the polymer character of DNA can also be activated for structure formation on the mesoscale. Depending on the sequence, certain ssDNA strands show a phase transition upon increasing the temperature (solubility/insolubility), and, similar to poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM, arguably the best known synthetic thermoresponsive polymer) the precipitating DNA forms defined colloidal objects. The physical origin of this process resides in a temperature-induced desolvation that is specific to selected nucleobases, and can thus be programmed via the sequence code. This additional length scale makes it possible to prepare all-DNA-based hierarchically structured complex colloids without templating, and simply by means of a trivial temperature ramping process. A major contribution to the success of this project was the clean synthesis of sequence-controlled

DNA multiblock copolymers and the exact study of their thermoresponsive behavior.

The key to success in the self-assembling systems lies in the management of the energy landscapes to capture defined metastable states via kinetic pathway guidance (Fig. 1). [1] Two antagonistic effects are operating: At the one hand, classical duplex formation occurs rapidly on the nanoscale and upon cooling, whereas, on the other hand, the new LCST-type phase-segregation proceeds slowly on the micronscale and during heating. By orchestrating the concert of both processes, complex hierarchical morphologies can be captured kinetically by duplex hybridization during cooling. A particular highlight are DNA protocells (built from two different sequence-defined DNA multiblock copolymers), which at the end of the heating process lead to a compartmentalized structure containing a liquid ssDNA solution (genetic information) under high osmotic pressure in a hydrogel shell of dsDNA. The process for their formation takes less than 10 minutes and a variety of functionalizations are possible. For instance, the incorporation of thermoplasmonic gold nanoparticles allows spatiotemporally controlled selective heating of the protocell shells in order to release DNA information from the core. In addition, cellular hydrogels can be created that show interesting mechano-adaptive behavior.

From the fundamentally new discovery of the LCST behavior of single-stranded DNA – and in combination with the antagonistic classical duplex hybridization – it has now become possible to design completely new ways to build all-DNA-based hierarchical materials in unprecedented combinations of length scales. A further exciting question is whether such heat-induced compartmentalization could have played a role in the selection of genetic information in later processes at the origin-of-life.

Fig.1: Antagonistic phase separation (polymer character) and DNA duplex hybridization (supramolecular character) allow complex microparticle architectures via kinetic pathway guidance. © Walther

## Bioinspirierte Energiedissipation in lasttragenden Systemen und Fassaden für das Bauwesen: Skalierungseigenschaften von porösen biologischen und biomimetischen Konstruktionen

S. Schmier<sup>1,2</sup>, G. Bold<sup>1,2</sup>, M. Thielen<sup>1,2</sup>, T. Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg, <sup>2</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft – SFB-Transregio 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Projekte A02 und B01

Im interdisziplinären Sonderforschungsbereich Transregio 141 werden natürliche Konstruktionsprinzipien als Vorbild genutzt, um spezifische Eigenschaften von Gebäuden und Gebäudeteile hinsichtlich ihrer Widerstandsfähigkeit zu optimieren. Inhärente Eigenschaften der biologischen Vorbilder wie die effiziente Nutzung von Ressourcen und ein geschlossener Materialkreislauf tragen dabei zur Nachhaltigkeit in Architektur und Technik bei. In den beiden im Folgenden beschriebenen Projekten dienen dabei die dreischichtige Fruchtwand der Kokosnuss sowie die faserige Rinde des Riesenmammutbaumes als biologische Vorbilder für eine Optimierung technischer Bauelemente hinsichtlich der immer mehr an Bedeutung gewinnenden Eigenschaften wie Leichtbau, Energiedissipation und punktueller Widerstandsfähigkeit.

Dabei deckt das interdisziplinäre Forscherteam, zu dem neben den im FIT angesiedelten Biologen und Bionikern auch Materialforscher, Ingenieure und Architekten der Universitäten Tübingen und Stuttgart zählen, die gesamte Bandbreite von den biologischen Vorbildern bis hin zur Prototypenherstellung der bioinspirierten Bauelemente ab. Neben den bereits genannten biologischen Vorbildern (untersucht von Botanikern und Biomechanikern der Universität Freiburg, PI: Prof. Thomas Speck) dienen auch Seeigelstachel (untersucht von Mineralogen und Materialforschern der Universität Tübingen, PI: Prof. Klaus Nickel) als

## Highlights

Ideegeber. Während sich die spröden und hoch-porösen Seeigelstachel sowie die Rinde des Riesenmammutbaums durch eine hohe Energiedissipationsfähigkeit auszeichnen, wird bei der Kokosnuss zusätzlich der Fokus auf die hohe punktuelle Widerstandsfähigkeit der inneren Fruchtwandschicht (des Endokarps) gelegt. Untersuchungen zur funktionellen Anatomie und Biomechanik der biologischen Vorbilder liefern die Grundlage, um bio-inspirierte, keramische und betonbasierte Baumaterialien zu verbessern. Dies geschieht zum einen durch eine Optimierung der Zusammensetzung der verwendeten Baumaterialien, zum anderen aber auch durch eine von den biologischen Vorbildern inspirierte innere Strukturierung dieser Baumaterialien. Durch diese Vorgehensweise soll die Widerstandsfähigkeit von Gebäuden und Gebäudeteilen gegenüber Überbelastungen erhöht werden, wie sie z.B. bei Erdbeben oder bei Unfallsituationen auftreten können, in denen Fahrzeuge wie z.B. Flugzeuge oder entgleiste Züge mit Gebäuden kollidieren. Dabei wird die Abstraktion der aus den biologischen Vorbildern gewonnenen Erkenntnisse durch Computersimulationen von Materialforschern und Mathematikern der Universität Stuttgart (PI: Prof. Siegfried Schmauder) unterstützt und die Implementierung wird von Ingenieuren und Architekten der Universität Stuttgart (PI: Prof. Werner Sobek) durchgeführt. Neben den Unterschieden in den Materialien, die dabei in Natur und Architektur verwendet werden, stellt die Skalierung (also der Übergang der Größenordnung zwischen biologischen Vorbildern und Gebäuden oder Bauteilen) eine große Herausforderung dar. Denn während die betrachteten biologischen Strukturen meist in einer Größenordnung von einigen Mikrometern bis hin zu einigen Zentimetern liegen, entstehen bei der technischen Übertragung Strukturen, die bis zu mehrere Meter groß sein können. Eine mathematische Beschreibung der Skalierungseigenschaften ist folglich notwendig, um Versagensgrenzen der technischen Strukturen, die im größeren Maßstab fehleranfälliger sind, richtig vorhersagen zu können. Während solche mathematischen Beschreibungen für homogene, isotrope, spröde Materialien bereits aus der Literatur bekannt sind [1, 2], müssen sie für nicht-spröde Materialien

(wie das Kokosnuss-Endokarp) erst noch entwickelt, bzw. angepasst werden.

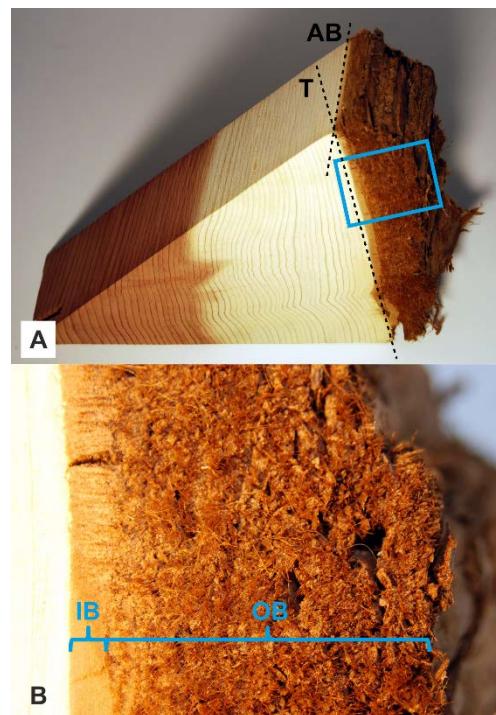


Abb. 1: Rinde des Riesenmammutbaums. Ausgesägtes Stück einer Baumscheibe (siehe auch FIT-Vitrine) (A) mit eingezeichnete apikal-basaler Achse (AB) sowie tangentiale Achse (T) des Baumstammes. Vergrößerter Ausschnitt der Rinde bestehend aus der dicken, lockeren und stark strukturierten äußeren Rinde (OB) mit deutlich erkennbar hohem Faseranteil sowie der dichten inneren Rinde (IB) (B). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Im Folgenden soll die Forschung an den beiden in der Plant Biomechanics Group Freiburg untersuchten biologischen Vorbildern vorgestellt werden. Als erstes Vorbild dient dabei die Rinde des Riesenmammutbaums (*Sequoia giganteum*). Sie zeichnet sich besonders durch ihre außergewöhnlich hohe Dicke (bis zu 90 cm [3]), sowie ihren hohen Anteil an Fasern aus und kann in die sehr lockere äußere sowie die deutlich dichtere innere Rinde unterteilt werden (Abb. 1). Durch die Dicke der Rinde sowie ihre geringe Dichte ist ein guter Schutz vor hohen Temperaturen gewährleistet, wie sie bei den im Heimatgebiet des Riesenmammutbaums (Sierra Nevada, U.S.A.) regelmäßig auftretenden Waldbränden auftreten können [4].

Ob die dicke Rinde des Riesenmammutbaumes auch vor den in der Sierra Nevada regelmäßig auftretenden Steinschlägen schützen kann, wurde bisher nicht untersucht. Dabei ist besonders die äußere, lockere Rinde von Interesse. Sie ist aus sich überlappenden Schichten aufgebaut, die trotz ihrer geringen Dichte einen starken Zusammenhalt besitzen. Quasi-statische sowie dynamische Druckversuche zeigen eine hohe Energiedissipationsfähigkeit der Riesenmammutbaumrinde im Vergleich zu der Rinde von anderen Baumarten, welche aus Regionen stammen, in denen Steinschläge nicht oder nur selten vorkommen. Somit bestätigt sich die Eignung der Riesenmammutbaumrinde als Vorbild für bioinspirierte technische Bauelemente mit hoher Energiedissipationsfähigkeit. Von besonderem Interesse ist dabei, dass die Höhe der Kraftspitzen während dynamischer Impaktversuche reduziert wird, während gleichzeitig die Dauer des Aufpralls verlängert wird. Diese Faktoren gewährleisten einen guten Schutz des unter der Rinde liegenden, überlebenswichtigen Kambiums [5, 6, 7].

Aktuell wird der, der hohen Energiedissipationsfähigkeit zugrunde liegende, Aufbau der inneren und äußeren Rinde näher untersucht. Die langen, dickwandigen Fasern in beiden Rindenteilen weisen dabei einen annähernd rechteckigen Querschnitt auf (Abb. 2).

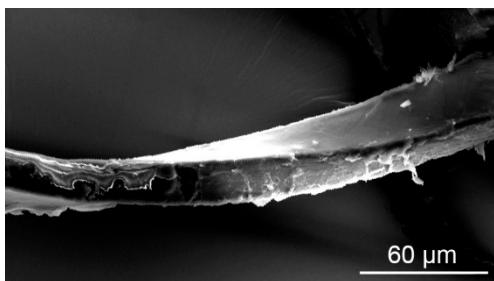


Abb. 2: Einzelne Faser der Rinde des Riesenmammutbaums mit nahezu rechteckigem Querschnitt (REM-Aufnahme). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Die langen Rindenfasern verteilen die auftretenden Belastungen auf ein größeres Rindenvolumen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Faserausrichtung in der Rinde. Die Fasern sind entlang der apikal-basalen Achse des Baumstammes ausgerichtet, weshalb die Rinde einen deutlich besseren Zusammenhalt

entlang der apikal-basalen Achse aufweist, als entlang der Tangentialachse. Im Laufe der aktuellen Forschung wird der Beitrag von innerer und äußerer Rinde, einzelnen Rindenschichten sowie einzelner Rindenfasern an der hohen Energiedissipationsfähigkeit der Rinde untersucht um den Einfluss unterschiedlicher hierarchischer Strukturebenen auf die Energiedissipation zu entschlüsseln [8].

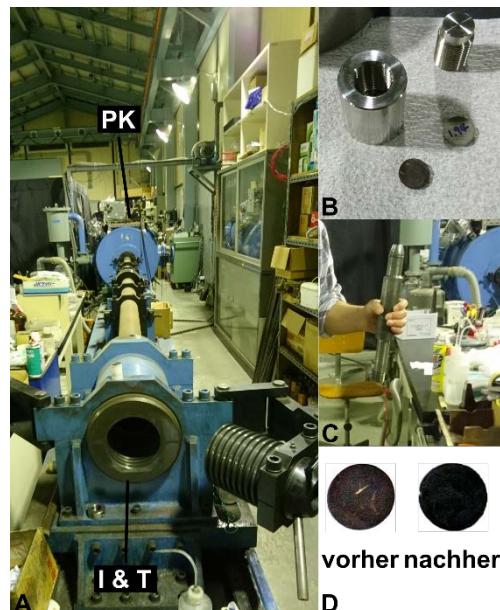


Abb. 3: Die Treibladungskanone am NIMS in Tsukuba. Die Probenkapsel mit Probe wurde am hinteren Ende der Vorrichtung in die Probenkammer (PK) am Ausgang des langen Beschleunigungsrohrs eingesetzt. Am vorderen Ende wurden der Impaktor und das Behältnis mit dem Treibmittel eingesetzt (I & T) (A). In die Probenkapsel wurde die Probe fest verschraubt (B). (C) zeigt das mit Treibmittel gefüllte Behältnis und (D) den Zustand der Probe vor und nach dem Test. Nach der Testung ist die Oberfläche der Probe durch die Verkohlung deutlich geschwärzt. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Als Ansatzpunkte für eine Übertragung in technische Bauelemente mit hoher Energiedissipationsfähigkeit dienen vor allem der geschichtete Aufbau der Rinde mit ihrem hohen Faseranteil, sowie das Deformationsverhalten der Rinde bei dynamischen Druckversuchen.

Wie außerordentlich widerstandsfähig das Kokosnuss-Endokarp ist, zeigten Versuche mit einer einstufigen Treibladungskanone (single stage propellant gun), die im Rahmen eines Forschungsaufenthalts einer Autorin (SSch)

## Highlights

am NIMS (National Institute for Materials Science) in Tsukuba, Japan, durchgeführt wurden. Hierzu wurden Endokarp-Proben mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Höhe von 1,5 mm hergestellt. Diese Plättchen wurden in Probenkapseln aus Edelstahl eingeschlossen, um ausschließlich von der Schockwelle getroffen zu werden, die durch den Aufprall eines Impaktors (Masse: 41 g) erzeugt wurde (Abb. 3). In den 4 Versuchen wurden unterschiedlich starke Druckstöße erzeugt (Min.: 1,5 GPa, Max.: 3,2 GPa). Nach den Versuchen war die Außenseite der Proben jeweils stark verkohlt (Fig. 3 D) und je stärker der aufgetretene Druck desto stärker war auch der Probenkern betroffen. Die Gesamtprobe war jedoch erst bei dem Versuch mit dem maximalen Druck komplett verkohlt und instabil.

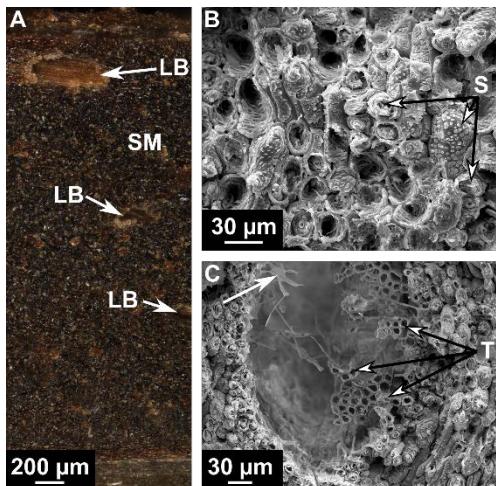


Abb. 4: Das Endokarp der Kokosnuss ist aufgebaut aus einer Sklereid-Matrix (SM) mit eingebetteten Leitbündeln (LB), was in einer Aufnahme mit dem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop zu sehen ist (A). In einer Detailaufnahme unter dem Rasterelektronenmikroskop (B) ist erkennbar, dass die Matrix aus vielen, dicht gepackten Sklereiden (S) besteht. Diese Zellen haben eine dicke Zellwand, die aus zahlreichen Zellwandschichten besteht. In der Detailaufnahme eines Leitbündels unter dem Rasterelektronenmikroskop (C) erkennt man die Tracheiden (T). Die Zellen des ehemaligen Phloems sind größtenteils aufgelöst und nur noch als Zellwandreste erkennbar (weißer Pfeil). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Diese hohe Widerstandsfähigkeit wird durch den hierarchischen Aufbau des Kokosnuss Endokarps hervorgerufen. Es besteht aus ei-

ner dichten Matrix stark signifizierter Sklereiden, in welche ein verzweigtes Netzwerk aus Leitbündeln eingebettet ist (Abb. 4) [6, 8, 9].

Momentan werden der Einfluss der unterschiedlichen hierarchischen Ebenen des Endokarps auf dessen mechanische Widerstandsfähigkeit, sowie die Skalierungseigenschaften, in unterschiedlichen Versuchsaufbauten untersucht [9].

[1] Z.P. Bazant (2000), Int J Solids Struc 37.1, 69-80

[2] R. Danzer, P. Supancica, J. Pascuala & T. Lubea (2007), Eng. Fract. Mech. 74, 2919-2932

[3] H. F. Kammeyer (1960), Mammuthäume, A. Ziemsen Verlag, Wittenberg

[4] G. Bauer, T. Speck, J. Blömer, J. Bertling & O. Speck (2010), J Mater Sci 45 (21), 5950-5959

[5] G. Bauer, S. Schmier, M. Thielen, T. Speck (2015), Proceedings of the 8th Plant Biomechanics International Conference 2015, Nagoya, Japan, 190-195

[6] K. Klang, G. Bauer, N. Toader, C. Lauer, K. Termin, S. Schmier, D. Kovaleva, W. Haase, C. Berthold, K.G. Nickel, T. Speck & W. Sobek (2016). In: Knippers, Nickel, Speck (eds.), Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures, 109-133

[7] T. Speck, G. Bauer, T. Masselter, S. Poppinga, S. Schmier, M. Thielen & O. Speck (2017). In: A. Geitmann, J. Gril (eds.), Plant Biomechanics. Springer International Publishing, Switzerland (accepted)

[8] S. Schmier, G. Bauer, G. Buck, K. Klang, C. Lauer, N. Toader, O. Gericke, W. Haase, I. Schäfer, S. Schmauder, W. Sobek, K.G. Nickel & T. Speck (2017). In: J. Knippers, U. Schmid, T. Speck (eds.), Baubionik, Naturkunde Museum Stuttgart, 42-61

[9] S. Schmier, C. Lauer, I. Schäfer, K. Klang, G. Bauer, M. Thielen, K. Termin, C. Berthold, S. Schmauder, T. Speck & K.G. Nickel. (2016), Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures, 277-294

## Bioinspired energy dissipation in load bearing systems and facades for building construction: Scaling of properties of porous biological and biomimetic constructions

S. Schmier<sup>1,2</sup>, G. Bold<sup>1,2</sup>, M. Thielen<sup>1,2</sup>,  
T. Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg, <sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

Project funding: German Research Foundation (DFG) – Collaborative Research Center SFB-TRR 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Projects A02 and B01

Within the interdisciplinary Collaborative Research Center Transregio 141 the specific properties of buildings or building components are optimized in terms of their mechanical resistance based on natural construction principles. Inherent properties of the biological role models such as an efficient use of resources and a closed material cycle contribute to sustainability in architecture and technology. The two projects presented in the following deal with the triple-layered fruit wall of the coconut palm as well as the fibrous bark of the giant sequoia. Those serve as role models to optimize technical components as to their lightweight design, energy dissipation capacity and puncture resistance, which gain more and more importance.

The interdisciplinary research team, which comprised in addition to the biologists and biomimeticists working in the FIT also materials scientists, engineers and architects from the Universities of Tübingen and Stuttgart, covers the entire range from the biological role models to the prototyping of the bio-inspired components. In addition to the already mentioned biological role models (investigated by botanists and biomechanics of the University of Freiburg, PI: Prof. Thomas Speck) also sea urchin spines serve as inspiration (studied by mineralogists and materials scientists of the University of Tübingen, PI: Prof. Klaus Nickel). While the brittle and highly porous sea urchin

spines and the bark of the giant sequoia are characterized by a high energy dissipation capability, the research focus concerning the coconut is additionally dealing with the high puncture resistance of the innermost fruit wall layer (the endocarp). Investigations on the functional anatomy and biomechanics of the biological role models provide the basis for improving bio-inspired ceramic and concrete based building materials. This is achieved on the one hand by optimizing the composition of the building materials used and on the other hand by an internal structuring of these building materials, inspired by the biological role models. By this procedure, an increased resistance of buildings and building elements to overloads, such as may occur in earthquakes or accident situations in which vehicles like airplanes or derailed trains collide with buildings, is achieved. The abstraction of the knowledge gained from the studies of the biological role models is supported by computer simulations carried out by material scientists and mathematicians from the University of Stuttgart (PI: Prof. Siegfried Schmauder), and the implementation is conducted by engineers and architects of the University of Stuttgart (PI: Prof. Werner Sobek). In addition to the differences in the materials used in nature and architecture, scaling (that is, the transition of size between biological models and buildings or components) is a major challenge. While the biological structures of interest are usually in the order of a few micrometres up to a few centimetres, the technical transfer creates structures reaching up to several meters in size. A mathematical description of the scaling properties is therefore necessary in order to properly predict the failure limits of the bioinspired technical structures, which are more prone to failure when scaled up. While such descriptions for homogeneous, isotropic and brittle materials are already known from the literature [1, 2], they have yet to be developed and/or adapted for non-brittle materials (such as the coconut endocarp).

In the following, the research on the two biological models investigated in the Plant Biomechanics Group Freiburg will be presented. The first example is the bark of the giant sequoia (*Sequoiadendron giganteum*). It is characterized by its exceptionally high thickness

## Highlights

(up to 90 cm [3]), as well as its high fibre content and can be subdivided into the very loose outer and the much denser inner bark (Fig. 1). The thickness of the bark and its low density ensure good protection against high temperatures, which are common during forest fires occurring regularly in the natural habitat of the giant sequoia (Sierra Nevada, USA) [4].

Whether the thick bark of the giant sequoia can also protect against rock fall events that occur regularly in the Sierra Nevada has not yet been investigated. The outer, loose bark is particularly important here. It consists of overlapping layers that, despite their low density, ensure a strong cohesion. Quasi-static as well as dynamic compression tests show a high energy dissipation capability of the giant sequoia bark in comparison with the bark of other tree species originating from regions without regular rock fall events. This confirms the suitability of the giant sequoia bark as a role model for bioinspired technical components with high energy dissipation capacity. It is of particular interest that during impact tests the magnitude of force peaks is reduced while at the same time the duration of the impact is prolonged. These factors ensure good protection of the vital cambium located underneath the bark [5, 6, 7].

Currently, the structure of the inner and outer bark underlying the high energy dissipation ability is being investigated. The long, thick-walled fibres present in both parts of the bark have an approximately rectangular cross-section (Fig. 2).

The long fibres distribute the occurring loads to a larger bark volume. An important role is played by fibre alignment. The fibres are aligned along the apical-basal axis of the trunk, which is why the bark has a markedly higher cohesion along the apical-basal axis, compared to the tangential axis. In the course of the present study, the contribution of inner and outer bark, individual bark layers and single bark fibres to the high energy dissipation capacity is being investigated in order to decode the influence of different hierarchical structural levels on the energy dissipation [8].

As starting points for a transfer to technical components with high energy dissipation capacity serve mainly the layered structure of the bark with its high fibre content, as well as the deformation behaviour of the bark in dynamic compression tests.

The extreme resistance of the coconut endocarp was demonstrated by experiments with a single stage propellant gun, that were carried out as part of a research stay of one of the authors (SSch) at the National Institute for Materials Science (NIMS) in Tsukuba, Japan. Endocarp samples with 12 mm x 1.5 mm (diameter x height) were produced for this purpose. These platelets were enclosed in a massive specimen capsule to be hit only by the pure shockwave created by the impact of an impactor with a mass of 41 g (Fig. 3). In the four experiments different impactor velocities and thus different pressures were generated (min.: 1.5 GPa, max.: 3.2 GPa). After the experiments the outside of each sample was strongly charred (Fig. 3D) and the stronger the pressure, the stronger the core of the sample was affected. However, only in the test with the highest pressure the entire sample was charred and fragile.

This high resistance is ensured by the hierarchical structure of the coconut endocarp. It consists of a dense matrix of strongly lignified sclereids, in which a branched network of vascular bundles is embedded (Fig. 4) [6, 8, 9].

Currently investigated is the influence of the different hierarchical levels of the endocarp on its mechanical resistance as well as the scaling properties [9].

Fig. 1: Bark of the giant sequoia. Piece of a tree cross section (see also FIT show case) (A), with marked apical-basal axis (AB) and tangential axis (T) of the tree trunk. Enlarged section of the bark showing the thick, loose and strongly structured outer bark (OB) with clearly recognizable high fibre content, as well as the denser inner bark (IB) (B). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: Single fibre of the giant sequoia bark with nearly rectangular cross-section (SEM-image). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 3: The powder gun at the NIMS. The capsule with the sample inside was placed at the rear end of the machine into the sample chamber (PK) right at the exit of the long acceleration tube. At the front end, the impactor and the gunpowder container

were mounted (I & T) (A). The sample was firmly screwed into the sample capsule (B). (C) shows the container of the gunpowder and (d) the condition of sample before (vorher) and after (nachher) testing. After testing, the sample is clearly blackened and charred. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 4: The endocarp of the coconut consists of a sclereid cell matrix (SM) with embedded vascular bundles (LB) are clearly visible in a confocal laser scanning microscope image (A). In an enlarged view under the scanning electron microscope (B) it can be seen that the sclereid cell matrix is composed of many densely packed sclereids (S). Those have a thick cell wall consisting of numerous cell wall layers. The detail of a vascular bundle under the SEM (C) shows the tracheids (T). The cells of the former phloem are largely dissolved and only recognizable as cell wall remnants (white arrow). © Plant Biomechanics Group Freiburg

## Adaptive Steifigkeit und gelenkfreie Bewegung bei stabförmigen Pflanzenorganen als Ideengeber für adaptive Baukonstruktionen

Marco Caliaro<sup>1,2</sup>, Anja Mader<sup>3</sup>, Jan Knippers<sup>3</sup>,  
Olga Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg und <sup>2</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT), <sup>3</sup>Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), Universität Stuttgart

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft – SFB-Transregio 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Projekt A03

Im Rahmen dieses interdisziplinären Projekts werden adaptive, stabförmige und gelenkfreie Strukturen bei Pflanzen und Tieren als Ideengeber für neuartige architektonische Systeme untersucht. Das Forschungsteam besteht aus Botanikern der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg (PBG) (PI: Dr. Olga Speck), Zoologen der Universität Tübingen (PI: Prof. Oliver Betz) sowie Ingenieuren (PI: Prof. Jan Knippers) und Mathematikern (PI: Prof. Oliver Röhrle) der Universität Stuttgart [1].

Kernfrage des hier vorgestellten Teilprojekts ist die Analyse von stabförmigen Strukturen bei Pflanzen, die als Aktuatoren fungieren, und von deren Wirkmechanismen, die durch

adaptive Steifigkeit und gelenkfreie Verbindungen charakterisiert sind. Die Abstraktion dieser Funktionsprinzipien in Form von Simulationen sind eine Grundvoraussetzung für die Übertragung auf neuartige bionische Systeme und Aktuatoren im Bausektor.

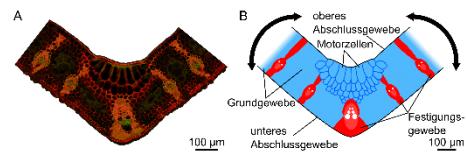


Abb. 1: Mikroskopischer Blattquerschnitt der Blaugrünen Segge (*Carex flacca*) (A) sowie eine schematische Darstellung der Gewebeverteilung (B). Die verholzten Gewebe (gelb angefärbt in A bzw. rot dargestellt in B) fungieren zusammen mit den Motorzellen als Gelenk ohne gleitende Teile. Aus [2], © PBG

Die Vielzahl der Mechanismen, die es Pflanzen erlaubt auf sich verändernde Umweltbedingungen zu reagieren, ist hochinteressant für eine Übertragung in die Architektur, denn sowohl Pflanzen als auch Bauwerke sind an ihren Standort gebunden. Pflanzen besitzen verschiedene Baupläne, die als Grundlage für Computermodelle und letztendlich für die Umsetzung in bionische Produkte dienen können. Bei Bauwerken können adaptive Systeme die technische Basis für neuartige Baukonstruktionen und Gebäudefassaden darstellen, die kontinuierlich auf sich ändernde Umweltbedingungen reagieren und somit das Potential hinsichtlich Effizienz und Nachhaltigkeit in der Architektur erhöhen.

Gelenkfreie Bewegungsprinzipien verschiedener Pflanzenvorbilder haben bereits die Entwicklung von nachgiebigen Fassadenbeschattungssystemen wie Flectofin® oder Flectofold inspiriert. Neben diesen Bewegungsprinzipien bietet der zelluläre Aufbau der Pflanzen Möglichkeiten für integrierte Aktuation und variable Steifigkeit. Im Allgemeinen sind Pflanzenzellen hydraulische Systeme, die als Aktuatoren dienen können.

Betrachtet man Dünnschnitte von Pflanzenstämmen im Mikroskop, findet man ganz unterschiedliche dreidimensionale Anordnungen der verschiedenen Gewebe, die im Quer-

## Highlights

schnitt sowohl asymmetrisch als auch symmetrisch angeordnet sein können. Pflanzenzellen mit besonderer mechanischer Wirkung sind die so genannten „Motorzellen“, die man zum Beispiel in Blättern von Süß- und Sauergräsern findet (Abb. 1). Es handelt sich dabei um besonders große unverholzte Zellen, die im Bereich des Abschlussgewebes in Gruppen angeordnet sind. Diesen Zellgruppen gegenüber, auf der Blattunterseite, findet man verholzte Gewebe und ein großes Leitbündel, die gemeinsam als Widerlager dienen. Zusammen funktionieren sie wie eine gelenkige Verbindung, aber ohne gleitende Teile, wie man sie üblicherweise in technischen Gelenken und Scharniere findet. Sind die Motorzellen prall gefüllt, öffnen sich die beiden Blathälften, sind sie weniger prall, schließt sich das Blatt [1-3].

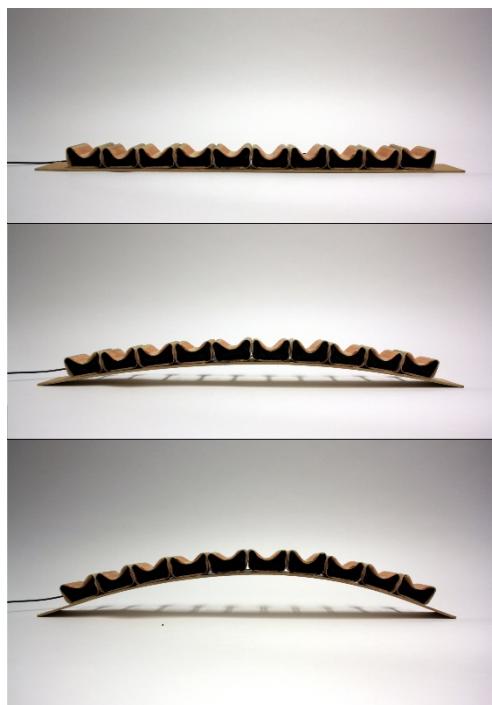


Abb. 2: Zellulärer Aktuator. Aus [2], © University of Stuttgart, ITKE

Inspiriert von diesem Funktionsprinzip wurde in Zusammenarbeit mit Ingenieuren des ITKE Stuttgart ein zellularer druckgetriebener Aktuator entwickelt, der in der Lage ist, Form und Steifigkeit zu variieren.

Der zellulare Aktuator (Abb. 2) besteht aus einer Reihe pneumatischer Zellen, die auf einer

Platte positioniert sind. Wird jede einzelne Zelle mit Druckluft beaufschlagt, so verlängert sich deren Oberseite, während die untere Seitenlänge unverändert bleibt. Insgesamt führt dies zu einer Krümmung der gesamten Struktur [2,3].

[1] O. Betz, A. Birkhold, M. Caliaro, B. Eggs, A. Mader, J. Knippers, O. Röhrle & O. Speck (2016): Adaptive stiffness and joint-free kinematics – Actively actuated rod-shaped structures in plants and animals and their biomimetic potential in architecture and engineering. – In: Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures (eds. J. Knippers, T. Speck & K. Nickel), 135-167, Springer.

[2] O. Speck, M. Caliaro, A. Mader & J. Knippers (2017): Pflanzen in Aktion. – In: J. Knippers, U. Schmid, T. Speck (eds.), Baubionik – Biologie beflügelt Architektur. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Stuttgart, pp 12-19.

[3] A. Mader, A. Birkhold, M. Caliaro, O. Speck, O. Röhrle & J. Knippers (2017): Plant-inspired compliant actuation. – In: Proceedings of the 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry, October 11-13, 2017, Stuttgart, Germany, pp. 233-237.

### Adaptive stiffness and joint-free kinematics in rod-shaped plant organs as concept generators for adaptive building constructions

Marco Caliaro<sup>1,2</sup>, Anja Mader<sup>3</sup>, Jan Knippers<sup>3</sup>, Olga Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg and

<sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bio-inspired Technologies (FIT), <sup>3</sup>Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), University of Stuttgart

Project funding: German Research Foundation (DFG) – Cooperative Research Centre 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Project A03

Within the scope of this interdisciplinary project, adaptive, rod-shaped and joint-free structures in plants and animals are investigated as a source of ideas for novel architectural systems. The research team consists of botanists of the Plant Biomechanics Group of the University of Freiburg (PBG) (PI: Dr. Olga Speck), zoologists of the University of Tübingen (PI:

Prof. Oliver Betz), as well as engineers (PI: Prof. Jan Knippers), and mathematicians (PI: Prof. Oliver Röhrle) of the University of Stuttgart [1].

Key question of the subproject presented here is the analysis of rod-shaped plant structures acting as actuators and of their functional principles characterized by adaptive stiffness and joint-free connection between different plant parts. The abstraction of these principles in terms of simulations is a prerequisite to guarantee the transfer into novel biomimetic actuators for built structures.

The variety of mechanisms that allow plants to react to changing environmental conditions is highly interesting for a transfer into architecture, because both plants and buildings are bound to their location. Plants have various bauplans, which can serve as a basis for computer models and ultimately for the conversion into biomimetic products. In the case of buildings, adaptive systems can provide the technical basis for innovative building constructions and building facades, which continuously react to changing environmental conditions and thus increase the potential with regard to efficiency and sustainability in architecture [2].

Hinge-less movement principles of various plant models have already inspired the development of compliant façade shading systems such as the Flectofin® or Flectofold. In addition to these movement principles, the cellular structure of plants offers possibilities for integrated actuation and variable stiffness. In general, plant cells are hydraulic systems that can serve as actuators.

Microscopic images of plant stems show various three-dimensional arrangements of the different tissues, which may be arranged asymmetrically or symmetrically in various cross-sections. Plant cells with a special mechanical effect are the so-called "motor cells", which can be found, for example, in leaves of grasses (Fig. 1). Motor cells are particularly large and non-lignified cells, which are arranged in groups in the epidermis on the upper side of the leaf. Opposite to these cell groups, on the lower side of the leaf, there are woody tissues and a large vascular bundle that jointly act as abutments. Together they work like a

jointed connection, but without the sliding parts that usually are found in technical joints and hinges. If the motor cells are fully turgescent, the two halves of the blade open, if they are less turgescent, the blade closes [1-3].

Inspired by this functional principle, a cellular pressure-driven actuator has been developed in cooperation with engineers from the ITKE Stuttgart that is capable of varying shape and stiffness. The cellular actuator (Fig. 2) consists of a row of pneumatic cells positioned on a plate. If compressed air is applied to each single cell, their upper side is extended in length, whereas the lower side length remains unchanged. In total, this leads to a bending of the entire structure [2,3].

Fig. 1: Microscopic cross-section of the blue sedge (*Carex flacca*) (A) and a schematic drawing of the tissue distribution (B). The lignified tissues (yellow in A respectively red in B) work together with the motor cells as a joint without any sliding parts. From [2], © PBG

Fig. 2: Plant-inspired cellular actuator. From [2], © University of Stuttgart, ITKE

## **Das biomimetische Fassaden-Verschattungssystem Flectofold**

Anna Westermeier<sup>1,2</sup>, Simon Poppinga<sup>1</sup>,  
Thomas Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg und <sup>2</sup>Freiburger Institut für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft – SFB-Transregio 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Projekt A04

Das Projekt A04 untersucht im Rahmen des SFB-TRR 141, wie sich die Kinematiken flächiger und gekrümmter Pflanzenoberflächen in biomimetische, adaptive Fassadenverschattungen übertragen lassen. Es basiert auf der Kooperation zwischen Biologen der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg (PBG, PI: Prof. T. Speck) und Ingenieuren des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE, PI: Prof. J. Knippers), sowie des Instituts für Baustatik und Baudynamik (IBB, PI: Prof. M. Bischoff) und des Instituts für Textil- und Fasertechnologien (ITFT,

## Highlights

PI: Prof. G. T. Gresser) der Universität Stuttgart [1].

Eine der pflanzlichen Ideengeber des Projektes ist das fleischfressende Wasserrad (*Aldrovanda vesiculosa*), das kleine Unterwasser-Schnappfallen ausbildet, mit welchen es innerhalb von 20 Millisekunden Kleinstlebewesen fangen kann [2]. Die geschlossene Falle bildet nach erfolgreichem Fang – mittels einer nachgeschalteten deutlich langsameren weiteren Verengungsbewegung – einen sogenannten „externen Magen“ und verdaut die Beute (Abb. 1). Im Fokus der bisherigen Forschung stand die anfängliche, schnellere Zuschnappbewegung, da diese die für Anwendungen in der Architektur interessanten Aspekt der kinematischen Amplifikation beinhaltet. Dabei wird durch eine geringfügige Biegung der Mittelrippe eine große Schließbewegung der beiden Fallenhälften induziert.

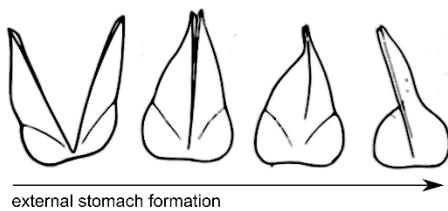


Abb. 1: Schnappfalle von *Aldrovanda vesiculosa* (apikale Ansicht). Verengungsbewegung zur Bildung eines externen Magens (verändert nach [6]). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Dieses grundlegende Aktuierungsprinzip der Pflanze wurde zunächst in ein vereinfachtes geometrisches „curved-line folding“ Model übertragen [3] (Abb. 2). Dabei sind zwei unbewegliche Flügel über eine flexible Gelenkzone mit einer steifen, elliptisch geformten Mittelrippe verbunden. Durch die Analyse des kinematischen Verhaltens mittels Finite Elemente Simulationen konnte der Einfluss verschiedener Parameter untersucht werden. Dadurch wurde ein spezifisches Verhältnis zwischen dem Radius der elliptisch geformten Mittelrippe und der Art der Kraftapplikation auf die Mittelrippe (pneumatisch induzierte Biegung) ermittelt, das besonders günstig in Bezug auf das Bewegungsverhalten, die Spannungsverteilung in der Gelenkzone und die benötigte Antriebskraft ist (Abb. 2).

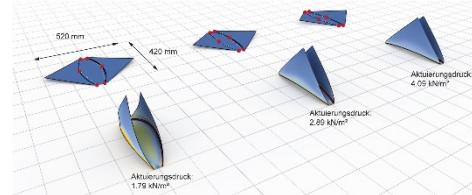


Abb. 2: Kinetisches Model des Flectofolds, das den Einfluss verschiedener Krümmungsradien auf das Faltverhalten (aus [5]).

Auf Grundlage der gewonnenen Informationen wurde anschließend ein Prototyp des Flectofold gebaut, für den von Seiten der Ingenieure/innen eigens eine spezifische Materialkombination aus glasfaserverstärktem Kunststoff entwickelt wurde [3, 4]. Durch individuelle Anordnung einzelner Flectofold-Elemente können Gebäudefassaden mit komplexen Topologien beschattet werden, was bislang mit herkömmlichen Gebäudeverschattungssystemen nicht oder nur mit großem konstruktivem Aufwand möglich war. Ein großer Demonstrator des Flectofold-Systems ist aktuell in der SFB-Transregio Ausstellung „Biologie befähigt Architektur“ im Naturkundemuseum Rosenstein in Stuttgart zu sehen [5].

Im weiteren Verlauf des Projektes steht unter anderem die oben angesprochene langsame Verengungsbewegung von *Aldrovanda* zur Bildung eines externen Magens im Fokus [2]. Dabei ist vordefiniert, welche Seite der Schnappfalle umklappt und sich an die gegenüberliegende anschmiegt, um den abgeschlossenen externen Magen zu bilden (Abb. 1). Welche Funktionsmorphologie und welche Mechanismen dieser Beobachtung zu grunde liegen, ist bislang nicht bekannt.

[1] S. Poppinga, A. Körner, R. Sachse, L. Born, A. S. Westermeier, L. Hesse, J. Knippers, M. Bischoff, G. T. Gresser, T. Speck: Springer International Publishing, 2016, pp. 169–193.

[2] J. Ashida, *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B*, vol. 9, no. 9, pp. 141–244, 1934.

[3] A. Körner, L. Born, A. Mader, R. Sachse, S. Saffarian, A. S. Westermeier, S. Poppinga, M. Bischoff, G. T. Gresser, M. Milwiche et al., *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 1, p. 17001, 2018.

[4] L. Born, A. Körner, G. Schieber, A. S. Westermeier, S. Poppinga, R. Sachse, P. Bergmann, O. Betz, M. Bischoff, T. Speck et al., *KEM*, vol. 742, pp. 689–696, 2017.

[5] A. S. Westermeier, S. Poppinga, A. Körner, L. Born, R. Sachse, S. Saffarian, J. Knippers, M. Bischoff, G. T. Gresser, T. Speck: Naturkunde Museum Stuttgart, 2017, pp. 30–39.

[6] F. E. Lloyd: *Chronica Botanica*, 1942.

## The biomimetic façade shading device Flectofold

Anna Westermeier<sup>1,2</sup>, Simon Poppinga<sup>1</sup>, Thomas Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg and

<sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bio-inspired Technologies (FIT)

Project funding: German Research Foundation (DFG) – Cooperative Research Centre 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Project A04

The research project A04 investigates within the framework of the CRC 141 how kinematics of planar and curved plant surfaces can be transferred to adaptive biomimetic façade shading systems. It is based on the cooperation of biologists of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg (PBG, PI: Prof. T. Speck) and construction engineers and architects from the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE, PI: Prof. J. Knippers), the Institute for Structural Mechanics (IBB, PI: Prof. M. Bischoff) and the Institute for Textile and Fiber Technologies (ITFT, PI: Prof. G. T. Gresser) of the University of Stuttgart [1].

One of the botanical concept generators is the carnivorous waterwheel plant (*Aldrovanda vesiculosa*), which possesses tiny underwater snap-traps with for catching small sized prey as fast as within 20 milliseconds [2]. After successful capture, the trap undergoes external stomach formation by a subsequent much slower narrowing movement and prey becomes digested (Fig. 1). The focus of previous research was on the initial fast closure movement that entails the aspect of kinematic amplification which is highly interesting for applications in kinetic architecture. Here, a large closing movement of the two trap lobes is induced by a relatively small bending deformation of the midrib.

At first, the underlying actuation principle of the trap was transferred into a simplified geometric curved-line folding model [3] (Fig. 2). Two rigid flaps were attached to a stiff, elliptically shaped midrib via a flexible hinge-zone. Through analysis of the kinematic behaviour using finite element simulations, the influence of different parameters could be investigated. In this way, a specific relation between the radius of the elliptically shaped midrib and the mode of force application onto the midrib (pneumatically induced bending) was identified, being particularly favourable regarding kinematic behaviour, stress distribution in the hinge-zone, and required actuation forces (Fig. 2).

Based on the thereby gained information, a Flectofold prototype was built for which a specific material combination of glass fibre reinforced plastics was developed by the engineering partners [3, 4]. By individually arranging single Flectofold elements, building facades with complex topographies can be shaded, which otherwise cannot be accomplished by conventional shading systems yet or only at great constructional effort. A large Flectofold demonstrator can be inspected in the CRC exhibition “Biologie befähigt Architektur” in the Natural History Museum Schloss Rosenstein in Stuttgart [5].

During the further course of the project, research will focus inter alia on the aforementioned slow narrowing movement of the *Aldrovanda* trap leading to external stomach formation [2] for which it is determined which trap lobe turns in to cling to the opposite lobe (Fig. 1). However, the underlying functional morphology and mechanisms are yet unknown.

Fig. 1: Snap-trap of *Aldrovanda vesiculosa* (apical view). Narrowing movement for external stomach formation (adapted from [6]). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: Kinetic model of the Flectofold showing the influence of different curved fold-line radii on folding behaviour (from [5]).

## Bioinspirierte verzweigte Tragwerkselemente aus faserverbundverstärktem Beton: Biologische Vorbilder, Forschung und Entwicklung

K. Bunk<sup>1,2</sup>, F. A. Jonas<sup>3</sup>, J. Knippers<sup>3</sup>,  
L. Born<sup>4</sup>, C. Möhl<sup>4</sup>, G. T. Gresser<sup>4</sup>,  
T. Speck<sup>1,2</sup>, T. Masselter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group (PBG) & Botanischer Garten, Universität Freiburg, <sup>2</sup>Freiburger Zentrum für Interaktive Werkstoffe und Bioinspirierte Technologien (FIT), Universität Freiburg, <sup>3</sup>Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), Universität Stuttgart, <sup>4</sup>Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT), Universität Stuttgart

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Sonderforschungsbereich TRR141: 'Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture', Projekt A06

Als interdisziplinäres Kooperationsprojekt der Plant Biomechanics Group (PBG, Universität Freiburg), dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE, Universität Stuttgart) sowie dem Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT, Universität Stuttgart) hat das Projekt A06 als Teil des Sonderforschungsbereichs TRR141 das Ziel, pflanzliche Verzweigungssysteme zu analysieren, Funktionsprinzipien zu identifizieren und zu abstrahieren, um diese mittels Faserverbundtechnologie in das Bauwesen zu übertragen. Konkret sollen verzweigte Knotenelemente in Tragwerkssystemen aus Beton mit einer geflochtenen Faserverbundhülle verstärkt werden, deren Form und Flechtstruktur von pflanzlichen Verzweigungsgeometrien und von den Faserverläufen im Inneren der Verzweigungen inspiriert sind [1].

In der ersten Förderperiode dieses für insgesamt 12 Jahre angelegten Projekts lagen die Schwerpunkte der Forschungsarbeit auf biologischer Seite auf der funktionsmorphologischen Analyse der ‚fingerförmigen‘ Verzweigung ausgewählter Araliengewächse (Familie Araliaceae) (Abb. 1A) [2] und auf Seite der Ingenieure auf der Entwicklung einer Stehfadenhalterung mit Einzelfadenspannungssteuerung an einer Radialflechtmaschine zur Herstellung triaxialer verzweigter Geflechte [1] sowie der experimentellen und numerischen

Analyse der Tragfähigkeit umschnürter Betondruckglieder [3]. Neben dieser intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird die erste Förderperiode, die bis Mitte 2018 läuft, mit der Herstellung und Prüfung erster bioinspirierter Knotenelemente abgeschlossen. Damit werden die entwickelten Methoden des triaxialen Flechtns dreischenkliger Verzweigungen, des Ausgießens dieser Hülle mit Spezialbeton sowie des Testens der Verzweigungen auf Biege- und Druckversagen in einer speziell hierfür gefertigten Prüfapparatur erstmals angewandt. Weiterhin kann so analysiert und evaluiert werden, inwiefern die Implementierung pflanzlicher Faserverläufe von einer Haupt- in eine Nebenachse - mit den genannten Methoden und deren Limitierungen in Geometrie, Material sowie Faseranzahl und Faseranordnung - in technische Verzweigungen möglich ist.

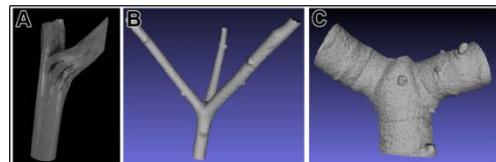


Abb. 1: 3-dimensionale Darstellung verschiedener Verzweigungsgeometrien, A) *Schefflera arboricola* ( $\mu$ CT), B) *Edgeworthia chrysanthra* (3D Scan), C) *Brugmansia* sp. (3D Scan). © PBG Universität Freiburg

Schwerpunkt der biologischen Untersuchungen in der ersten Förderperiode war die vergleichende Analyse der Verzweigungsmorphologie der drei Araliaceen-Arten *Schefflera arboricola*, *Fatsia japonica* und *Polyscias balfouriana* [2]. Dabei wurden nicht nur die äußeren Verzweigungsgeometrien und die inneren Faserverläufe dieser drei Arten verglichen, sondern auch die ontogenetische Entwicklung einer seitlichen Verzweigung aus einer Blattinsertionsstelle nach apikaler Dekapitierung [2]. Auf Basis der Ergebnisse dieser Studie, werden weitere Arten der Familie der Araliengewächse untersucht. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der unterschiedlichen Ausprägung der ‚fingerförmigen‘ Verzweigungen und deren Zusammenhang mit dem Alter der Verzweigung und der Wuchsform der Pflanze. Morphologische und biomechanische Analysen werden hier insbesondere auch vergleichend zu *Schefflera arboricola* durchgeführt.

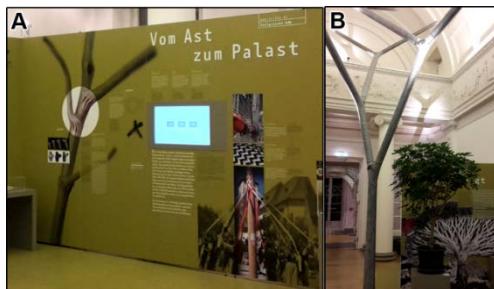


Abb. 2: Ausstellungsmodul A06 der Sonderausstellung „baubionik“ im Staatlichen Museum für Naturkunde Stuttgart, Schloss Rosenstein, A) Stellwand mit Bild der fingerförmigen Verzweigung von *Schefflera arboricola*, B) 6 m hoher Demonstrator aus geflochtenen Verzweigungsmodulen. © PBG Universität Freiburg

Ausgehend von den bisher untersuchten Verzweigungen wurde in der ersten Phase des Projekts A06 bereits ein Screening nach weiteren Verzweigungsgeometrien begonnen (Abb. 1). Beispiele hierfür sind neben der fingerförmigen Verzweigung der Araliaceen (Abb. 1A) die apikale trichotome Verzweigung von *Edgeworthia chrysanthia* (Abb. 1B) oder die „wulstförmige“ Verzweigung von *Brugmansia* sp. (Abb. 1C). Neben der Visualisierung weiterer Verzweigungsformen mittels µCT (Abb. 1A) oder 3D-Scanning (Abb. 1B, C) sollen diese Verzweigungen in einem nächsten Schritt mithilfe eines schematischen Verzweigungskataloges eingeordnet und kategorisiert werden. Durch eine simultane Analyse und Einordnung von Verzweigungssystemen aus Architektur und Bauwesen in diesen Katalog können Verzweigungen aus Natur und Technik unter verschiedenen Aspekten verglichen werden [4]. Hierbei können folgende Fragen beantwortet werden: Welche Formen kommen natürlich vor und welche nicht? Gibt es strukturelle oder mechanische Gründe für das Fehlen bestimmter theoretisch möglicher Verzweigungstypen? Welche Verzweigungsgeometrien (optimiert für welche Belastungen) werden im Bauwesen benötigt? Wo gibt es Überschneidungen und wo ist das Screening nach pflanzlichen Formen noch auszuweiten?

Unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten hinsichtlich Material und Fertigung, soll dieses gezielte Screening in der nächsten Phase des Projektes A06 zu spezifischeren biomimetischen Optimierungen mithilfe neuer biologischer Vorbilder führen.

Im Rahmen der Sonderausstellung des SFB-TRR141 „baubionik - biologie befähigt architektur“ im Staatlichen Museum für Naturkunde Stuttgart, Schloss Rosenstein, werden bis Mai 2018 Forschungsergebnisse und Demonstratoren des Projektes A06 ausgestellt (Abb. 2). Highlights des Ausstellungsmoduls „Vom Ast zum Palast“ (Abb. 2A) sind dabei unter anderem am FIT der Universität Freiburg angefertigte µCT Aufnahmen der Verzweigung von *Schefflera arboricola* (Abb. 1A), die die Basis für FE Simulationen von belasteten Verzweigungen darstellen, sowie ein ca. 6 m hoher Demonstrator aus beflochtenen Verzweigungsmodulen (Abb. 2B). Weiterhin wird das Forschungsprojekt A06 in einem eigenen Kapitel des populär-wissenschaftlichen Museumsbegleitbandes ausführlich vorgestellt [5].

- [1] L. Born, F. A. Jonas, K. Bunk, T. Masselter, T. Speck, J. Knippers, G. T. Gresser, In: J. Knippers, K. Nickel, T. Speck (Hrsg.), Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures, 195-215 (2016)
- [2] K. Bunk, S. Fink, T. Speck, T. Masselter, Trees – Structure and Function, 31, 1793-1809 (2017)
- [3] F. Jonas, J. Knippers, Beton- und Stahlbetonbau 112(8), 517-529 (2017)
- [4] I. Md Rian, M. Sassone, Frontiers of Architectural Research, 3, 298-323 (2014)
- [5] K. Bunk, F. A. Jonas, L. Born, G. T. Gresser, J. Knippers, T. Speck, T. Masselter, In: J. Knippers, U. Schmid, T. Speck (Hrsg.), Baubionik – Biologie befähigt Architektur, 113-120 (2017)

## Bio-inspired branched nodal elements out of fibre-reinforced concrete: Biological concept generators, research and development

K. Bunk<sup>1,2</sup>, F. A. Jonas<sup>3</sup>, J. Knippers<sup>3</sup>,  
L. Born<sup>4</sup>, C. Möhl<sup>4</sup>, G. T. Gresser<sup>4</sup>,  
T. Speck<sup>1,2</sup>, T. Masselter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group (PBG) & Botanic Garten, University of Freiburg, <sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT), University of Freiburg, <sup>3</sup>Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), University of Stuttgart, <sup>4</sup>Institute for Textile and Fiber Technology (ITFT), University of Stuttgart

Project funding: German Research Foundation (DFG), Collaborative Research Centre TRR141: 'Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture', Project A06

As an interdisciplinary cooperation project of the Plant Biomechanics Group (PBG, University of Freiburg), the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE, University of Stuttgart) and the Institute for Textile and Fiber Technology (ITFT, University of Stuttgart), the project A06 as part of the Collaborative Research Centre TRR141 aims for analysing plant branching systems, identifying and abstracting functional principles in order to transfer these via fibre technology into applications for constructional engineering. Specifically, branched nodal elements in building constructions out of concrete shall be strengthened by a braided, fibre-reinforced hull, whose shape and braiding structure are inspired by plant branching geometries and their internal fibre arrangement [1].

In the first funding period of this project which is planned for 12 years in total, the research focus was laid on the side of biology on the functional-morphological analysis of the 'finger-like' ramifications of selected Araliaceae (Fig. 1A) [2]. On the side of engineering the main emphasis was laid on the development of a filler yarn holder with single fibre tension control in a radial braiding machine to fabricate triaxial branched braidings [1], as well as the experimental and numerical analysis of the strength of confined concrete compression members [3].

Besides this intensive work in research and development the first funding period which runs until July 2018, will be concluded with the fabrication and testing of first bio-inspired nodal elements. The developed methods of braiding triaxial ramifications with three legs and the filling of these hulls with special concrete as well as the testing of the ramifications in bending and compression via a specially developed testing rig will be implemented for the first time. Moreover, it will be possible to analyse and evaluate to what extent the implementation of plant fibre progressions from a main stem into a side branch is feasible into technical ramifications - with the mentioned methods and their limitations in geometry, material as well as amount and arrangement of fibres.

Focus of the biological research in the first funding period was the comparative analysis of the branching morphology in the three Araliaceae species *Schefflera arboricola*, *Fatsia japonica* and *Polyscias balfouriana* [2]. Not only the outer geometries of the stem-branch attachments and their internal fibre progressions, but also the ontogenetic development of lateral branches from leaf insertion zones after apical decapitation were compared in this study [2]. Based on those results, further species of the Araliaceae family are analysed. Hereby the focus is laid on different characteristics of the 'finger-like' branching morphology and its correlation with the age of the stem-branch attachment and the growth habit of the plant. Morphological and biomechanical analyses are conducted especially in comparison to *Schefflera arboricola*.

Based on the plant branchings which have been analysed up to this point, a screening for further natural branching geometries has already been initiated in project phase one (Fig. 1). Besides the 'finger-like' ramification of the Araliaceae (Fig. 1A), further examples are the apical trichotomous ramification of *Edgeworthia chrysantha* (Fig. 1B) or the 'bulge-like' branching of *Brugmansia* sp. (Fig. 1C). Besides the visualization of additional geometries via µCT (Fig. 1A) or 3D scanning (Fig. 1B, C), these branchings shall be consecutively classified and categorized via a

schematic branching shape catalogue. Together with a simultaneous analysis and classification of branching systems from architecture and constructional engineering that will also be included in this catalogue, ramifications from nature and technology can be compared under various aspects [4]. Questions to be answered include: Which geometries occur naturally and which do not? Are there structural or functional reasons why specific theoretically possible branching geometries do not occur naturally? Which branching shapes (optimized for which load cases) are needed in constructional engineering? Are there overlaps and where do we still need to intensify the screening for plant ramifications?

In consideration of the technical feasibility by material and manufacturing, this systematic screening in the next phase of project A06 shall lead to more specific biomimetic optimizations with the help of new biological concept generators.

As part of the special exhibition of TRR141 ‘baubionik – biologie beflügelt architektur’ at the Rosenstein Museum Stuttgart, research results and demonstrators of the project A06 will be displayed until Mai 2018 (Fig. 2). Highlights of the exhibition module ‘Vom Ast zum Palast’ (Fig. 2A) are amongst others µCT scans of a stem-branch attachment of *Schefflera arboricola*, executed at the FIT, University of Freiburg (Fig. 1A), which are the basis for Finite Element simulations of loaded ramifications, as well as a demonstrator made out of braided branched elements with a height of approximately 6 m (Fig. 2B).

Furthermore the research project A06 is extensively described in an individual chapter as part of the popular-scientific book, accompanying the exhibition [5].

Fig. 1: Three-dimensional rendering of different branching geometries, A) *Schefflera arboricola* (µCT), B) *Edgeworthia chrysanthra* (3D Scan), C) *Brugmansia* sp. (3D Scan). © PBG University of Freiburg

Fig. 2: Module A06 of the special exhibition ,baubionik’ in the Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart, Schloss Rosenstein, A) Partition wall with picture of the ‚finger-like‘ stem-branch attachment of *Schefflera arboricola*, B) Demonstrator made of braided nodal elements. © PBG University of Freiburg

## Morphological changes of crystallizable diblock copolymer in quasi-2-dimensions

E. Khechine<sup>1,2</sup>, G. Reiter<sup>1,2,3</sup> & R. Reiter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Experimental Polymer Physics, University of Freiburg, <sup>2</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT), <sup>3</sup>Freiburg Materials Research Center (FMF)

Project Funding: German Research Foundation (DFG) - Cooperative Research Center 141 “Biological Design and Integrative Structures-Analysis, Simulation and Implementation in Architecture” - Project A08

Quasi-2-dimensional (quasi-2D) polymer films deposited on a Langmuir trough allow studying changes in morphology, which are induced by variation of the areal density of the deposited molecules. One expects that phase transitions like crystallization in quasi-2D and 3D lead to differences in morphologies. Therefore, we have investigated Langmuir films of a diblock copolymer (BCP) of poly-ethylene-oxide (PEO) and poly-L-lactic-acid (PLLA). In the bulk, the melting temperature of PEO and PLLA are distinctly different. However, due to the influence of the second block and confinement effects in quasi-2D we anticipate to observe deviations from bulk values. Furthermore, the two blocks have different affinities to water and correspondingly different surface mobilities. Thus, even at temperatures below the lowest melting point of the two blocks, we are not certain that both blocks crystallize at the same time. Alternatively, crystallization of one block (probably PLLA) may drive crystallization of the second one. Accordingly, we aim to identify crucial parameters of crystal nucleation and growth.

For our study, we chose a polymer with a low molecular weight of 3690 g/mol in order to enable fast kinetics of microstructure formation. The total length of the BCP in its crystalline state is around 20 nm. The molecular weights of both blocks are similar. However, the maximum length of the crystalline PLLA block is around 7 nm while the corresponding length of the PEO block is around 13 nm [1], [2].

Characterization of a Langmuir monolayer is provided through the measurement of the isotherm where during compression at a constant

rate the surface pressure is recorded as a function of the mean area per molecule. When Langmuir films of PEO-PLLA block copolymer were compressed at a moderate compression rate of  $78 \text{ \AA}^2/\text{molecule}\cdot\text{min}$ , the isotherm showed a smooth and rather monotonic increase in surface pressure. However, at slower compression rate of  $26 \text{ \AA}^2/\text{molecule}\cdot\text{min}$ , a region of decreasing surface pressure with decreasing area per molecule, a so-called “depression” appeared at values around  $300 - 350 \text{ \AA}^2$  (Figure 1). This rate-dependent behavior hints at a first order phase-transition initiated by a rate-dependent nucleation process.

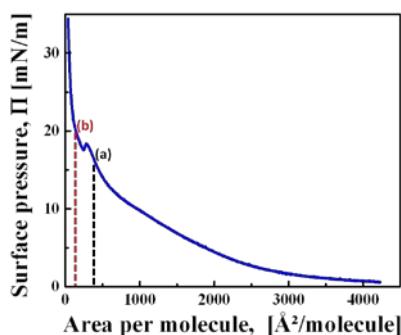


Fig. 1: Isotherm of PEO-PLLA measured at  $20^\circ\text{C}$ . At the areas per molecules marked by (a) and (b) we have transferred the Langmuir film and investigated the resulting morphologies. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

In order to explore the origin of the “depression” at slow compression rates, we examined the resulting morphological features. In particular, we examined the resulting structures and tried to relate these structures to the characteristic area per molecule at which the “depression” was observed.

To visualize the morphologies through atomic force microscopy (AFM), we transferred the films onto a solid substrate, using the Langmuir-Schäfer transfer approach. In Figure 1, we indicated the positions where the films were transferred at larger and smaller areas than the “depression”. The corresponding AFM images are shown in Figures 2 and 3.

At position (a) in Figure 1, the AFM height image (Figure 2a) revealed circular objects, which are characterized by a minimum radius

of curvature. The fibrillar spiral-like morphology of these objects suggests that they may consist of edge-on crystalline lamellae having formed already on the water surface. These lamellae have a characteristic width of ca. 20 nm, which is comparable with the maximum length of the block copolymer in its crystalline state (Figure 2b).

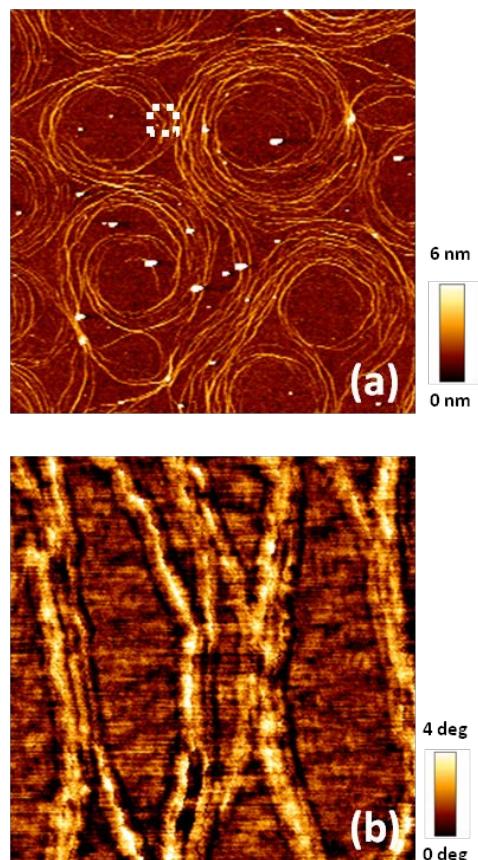


Fig. 2: (a)  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  AFM **height** image taken from a film transferred at position (a) indicated in Figure 1. (b) Corresponding **phase** image from a small area of  $500 \times 500 \text{ nm}^2$  showing four bundles consisting each of three fibrillary structures having a width of ca. 20 nm. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

After compressing the BCP film to the smaller area per molecule indicated by position (b) in the isotherm, we observed significant rearrangements of the circular spiral-like structures.

As a result, areas consisting of a large number of parallel fiber-like structures, all having a preferred orientation over long distances. (Figure 3).

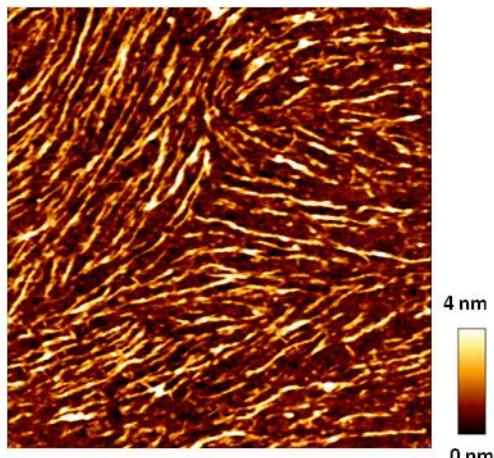


Fig. 3: 4x 4 μm<sup>2</sup> AFM **height** image taken from a film transferred at position (b) indicated in Figure 1. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Further systematic studies in progress, exploiting additional *in situ* Brewster angle microscopy measurements, and focus on the evolution of the structure at different annealing temperatures.

[1] Yasuhiro Takahashi and Hiroyuki Tadokoro, *Macromolecules*, 1973.

[2] S. Sasaki and T. Asakura, *Macromolecules*, 2003.

### **Energetische Untersuchungen zur induzierten Aufnahme von Partikeln in funktionalisierte, syn- thetische Membransysteme**

R. Omidvar<sup>1,2,3</sup> J. Madl<sup>1,2,3</sup> und W. Römer<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Fakultät für Biologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, <sup>2</sup>Zentrum für Biologische Signalstudien (BIOS), Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, <sup>3</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT), Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG RO 4341/3-1)

Diese Studie ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt basierend auf der Kooperation von Biologen/ Biophysikern der Arbeitsgruppe „Synthetische Biologie von Signalprozessen“ der Fakultät für Biologie an der Universität Freiburg (PI: Jun.-Prof. Dr. Winfried Römer) mit Physikern der Bio- und Nano-Photonics

Gruppe des Instituts für Mikrosystemtechnik (IMTEK) an der Universität Freiburg (PI: Prof. Dr. Alexander Rohrbach).

Pathogene Bakterien wie *Pseudomonas aeruginosa* (PA) können insbesondere bei immungeschwächten Patienten Infektionen und Krankheiten verursachen [1]. Das Andocken der Pathogene an spezifische Wirtszellen ist der erste Schritt des Infektionsmechanismus. Danach kann die Zellmembran in einer Art deformiert werden, dass das Bakterium zuerst umwickelt und in der Folge in das zelluläre Zytosplasma aufgenommen wird. Die Verformung der Zellmembran für die Aufnahme von Partikeln ist auch bei anderen biologischen Phänomenen wie viraler Infektion oder bei Mikrowirkstoffträgern entscheidend [2].

Im Falle des PA Bakteriums wurde gezeigt, dass das Umfließen des Bakteriums meist durch spezifische Wechselwirkungen von bakteriellen Oberflächenmolekülen mit Wirtszellrezeptoren ausgelöst wird, gefolgt von einer Membraneinstülpung und anschließender Reorganisation von innerzellulären Bestandteilen, wie z.B. des Aktin-Kortex [2]. PA-Bakterien setzen z.B. ihre an der Oberfläche lokalisierten Lektinmoleküle als Liganden ein, um an Glykosphingolipid-Rezeptoren der Wirtszelle zu binden [3].

In vorangehenden Arbeiten unseres Labors konnten wir interessanterweise zeigen, dass die spezifische Bindung des bakteriellen Lektins LecA an das Glykolipid Globotriaosylceramid (Gb3) völlig ausreicht, um das Umfließen des Bakteriums mit der Membran von Riesenliposomen (Giant Unilamellar Vesicles, GUV) als Minimalmodell der Zellmembran zu induzieren. Dies unterstreicht die Bedeutung der Ligand-Rezeptor-Wechselwirkung, welche sogar in einem synthetischen System, welches weder einen Aktin-Kortex noch eine aktive Endozytose-Maschinerie aufweist, zum Umfließen führen kann [4]. Das Glykolipid Gb3 ist auch der Angriffspunkt für bakterielle Toxin-Untereinheiten anderer Bakterien, z.B. Shiga-Toxin von *Shigella dysenteriae* [5]. Wegen der Wichtigkeit der spezifischen Ligand-Rezeptor-Interaktion für das Umfließen des Bakteriums mit Membran, entschlossen wir uns, die physikalische Wechselwirkung eines mit Ligan-

## Highlights

den beschichteten Partikels, welches der Pol-region eines PA-Bakteriums ähnelt, mit einem Rezeptor-hältigen, synthetischen Lipid-Doppelschichtsystem zu untersuchen. Diese Studie wird es uns ermöglichen, ein tieferes Verständnis der grundlegenden Mechanismen zu erlangen, welche die Aufnahme von Partikeln und im Speziellen von Bakterien in biologische Zellen antreiben.

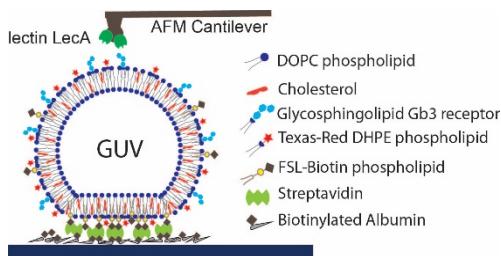


Abb. 1: Ein Riesen-Liposom welches den Gb3-Rezeptor enthält und ein minimales zelluläres System darstellt, wechselwirkt mit einer LecA-funktionalisierten AFM-Sonde, welche das Bakterium darstellt. © Synthetic Biology of Signalling Processes Group, Faculty of Biology, Freiburg.

Um die physikalischen Wechselwirkungen zu quantifizieren, verwenden wir Rasterkraftmikroskopie (engl. Atomic Force Microscopy, AFM) zur Messung der Wechselwirkungs Kräfte zwischen LecA-beschichteten sphärischen Sonden und Gb3-hältigen GUVs. AFM ist hervorragend zum Vermessen von physikalischen Kräften in verschiedenen biologischen Anwendungen geeignet, z.B. beim Untersuchen von Protein-Domänen-Entfaltung [6], Einzel-Liganden-Rezeptorbindung [7] und der Ablösung einzelner Zellen von einer anderen Zelle [8] oder von einem Substrat [9]. Ein Mikro-Balken (engl. Cantilever) wird in weitem Abstand von der Oberfläche über der Probe positioniert und so lange nach unten bewegt, bis er die Oberfläche an einem Punkt berührt und diesen Punkt weiter nach unten eindrückt. Die Kraftsonde kann sofort oder nach einer bestimmten Zeit von der Oberfläche zurückgezogen werden, bis wieder eine vollständige Loslösung von der Probenoberfläche vorliegt. Während dieses Zyklus wird die vertikale Auslenkung des Cantilevers präzise über ein Laser-Detektionssystem aufgezeichnet und danach über das Hooke'sche Gesetz in eine Kraft umgewandelt. Abbildung 1 zeigt die

schematische Darstellung der GUV-Geometrie und der LecA-beschichteten Kraftsonde.

GUVs wurden unter Verwendung von Elektroformation hergestellt, so wie es in folgendem Protokoll detailliert beschrieben ist: [10]. Die Vesikelmembran enthielt 1,2-Dioleoyl-sn-glycero-3-phosphocholin (DOPC), Cholesterin, Gb3, FSL-Biotin und TR-DHPE (59,5: 30: 5: 5: 0,5). Um eine laterale Bewegung der Vesikel zu vermeiden während der AFM-Cantilever eine Kraft auf diese ausübt, haben wir die Vesikel chemisch auf dem Substrat immobilisiert. FSL-Biotin-Moleküle wurden zu den GUVs hinzugegeben, damit diese an einem Avidin- oder Streptavidin-funktionalisierten Substrat anhaften.

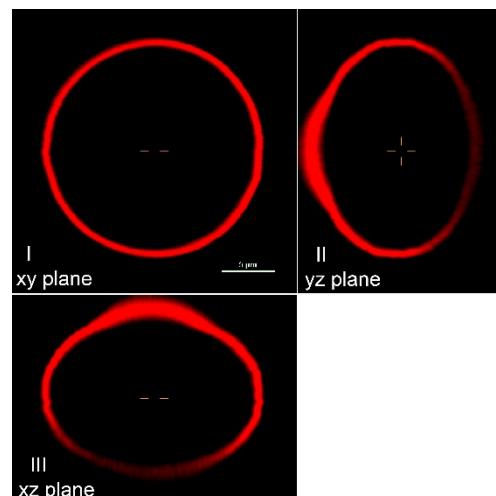


Abb. 2: Konfokalmikroskopie-Bild eines Biotin-enthaltenden GUVs, das an ein Streptavidin-beschichtetes Substrat gebunden hat. Die äquatoriale xy-Ebene (I) und die beiden Querschnitte (yz (II) und xz (III)) sind gezeigt. © Synthetische Biologie von Signalprozessen Gruppe, Fakultät für Biologie, Freiburg.

Zur Herstellung eines funktionalisierten Substrats wurden runde Glasplättchen mit einem Durchmesser von 22 mm zuerst in Ethanol (50% v:v) beschallt, dann mit destilliertem Wasser gewaschen, gefolgt von Beschallung in einer Natriumhydroxidlösung und Waschen mit destilliertem Wasser. Die Glasplättchen können einige Tage in destilliertem Wasser gelagert werden. Vor dem Experiment wurde die Deckglasoberfläche unter Stickstoff getrocknet und zuerst durch eine Biotin-konjugierte Rinderserumalbumin-Lösung (engl. bo-

vine serum albumin, BSA, 0,1 mg/ ml) für mindestens 2 Stunden passiviert, gefolgt von einer Inkubation mit Streptavidin (0,1 mg/ ml in PBS) für 30 Minuten. Abbildung 2 zeigt ein immobilisiertes GUV auf einem Streptavidin-funktionalisierten Deckglas.

Nach dem Waschen des funktionalisierten Substrats mit PBS, um die ungebundenen Streptavidinmoleküle zu entfernen, wurde es in den JPK-Deckglashalter eingebaut. Der Halter wurde mit frischer PBS-Lösung befüllt und circa 1  $\mu\text{l}$  GUV-Lösung wurden zugegeben. Bevor die Kraftsonde mit Lektinmolekülen funktionalisiert wurde, testeten wir die Wechselwirkungskräfte zwischen GUVs und Albumin-beschichteten, kolloidalen Kraftsonden mit einer Siliziumdioxidkugel von 0,8  $\mu\text{m}$  Durchmesser. Die Kraftsonden wurden durch Plasmabehandlung gereinigt und dann in einem 50  $\mu\text{l}$  Tröpfchen Albuminlösung (0,1 mg/ ml) bei 37 °C über Nacht inkubiert. Zusätzlich zu den oben erwähnten Vesikeln mit Gb3-Rezeptoren ( $\text{GUV}^{+\text{Gb3}}$ ) testeten wir auch Vesikel, die keine Gb3-Rezeptoren enthielten ( $\text{GUV}^{-\text{Gb3}}$ ). Das JPK Cellhesion 200 System wurde verwendet, um Vesikel mit niedrigen Kraftwerten (etwa 100 pN) leicht einzudrücken. Die Kraft- gegen Eindrücktiefe-Kurven wurden aufgezeichnet und der Rückzugsteil der Kurven (rote Kurve) wurde analysiert (Abbildung 3A). Die Kurven zeigten unspezifische Wechselwirkungen von Albumin-beschichteten Kraftsonden mit GUVs, unabhängig davon, ob sie Gb3-Rezeptoren enthielten oder nicht. Mehrere Vesikel wurden untersucht und mehrere Kurven wurden auf jedem einzelnen Vesikel aufgezeichnet. Die schraffierte Fläche in Abbildung 3A, die von dem Rückzugabschnitt der Kraft-Eindrücktiefe-Kurve umschlossen ist, wird als "Trennarbeitswert" (engl. Detachment Work,  $W_D$ ) bezeichnet und ist die Arbeit, die erforderlich ist, um das Substrat von der Membran zu lösen, und kann zur Beschreibung der Haftfestigkeit zwischen beschichteten Substraten und Membran verwendet werden. Wie in Abbildung 3B gezeigt, gibt es keinen signifikanten Unterschied für den Trennarbeitswert zwischen zwei unterschiedlichen Vesikeln.

Um die Cantilever mit Lektinproteinen zu funktionalisieren, wurden sie auf ähnliche Weise gereinigt und in 50  $\mu\text{l}$  Tröpfchen einer Biotin-BSA-Lösung (0,1 mg/ ml) bei 37°C über Nacht inkubiert. Nach dreimaligem Waschen der Cantilever, indem sie in PBS getaucht wurden, wurden sie 30 Minuten in einem 50  $\mu\text{l}$  Tröpfchen Streptavidin-Lösung (0,1 mg/ ml) gegeben. Nach dem Wiederholen des Waschschritts wurden sie für weitere 30 Minuten in biotinylierte LecA-Lösung (0,1 mg/ ml) gegeben. Sie wurden erneut gewaschen und konnten einige Tage bei 4°C in PBS gelagert werden [11]. Unter Verwendung ähnlicher Bedingungen, die für Albumin-beschichtete Cantilever festgelegt wurden, wurden die Kraft- Eindrücktiefe-Kurven für Lektin-beschichtete Cantilever aufgezeichnet.

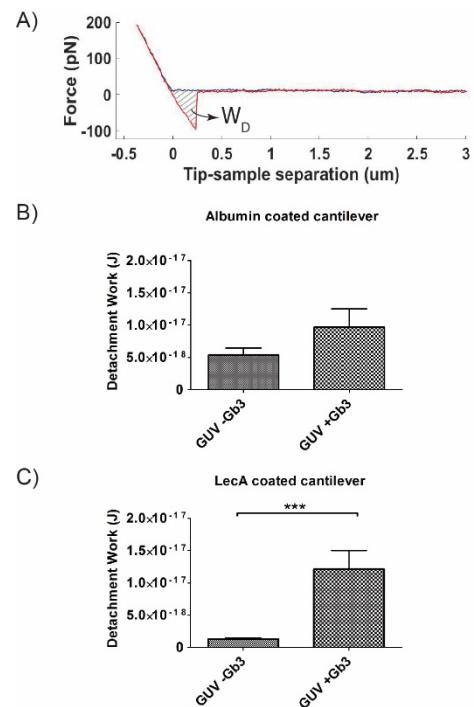


Abb. 3: Repräsentative Kraft-Abstands-Kurven für Albumin-beschichtete Cantilever an einem Vesikel (mit oder ohne Gb3). Vergleich des Trennarbeitswertes ( $W_D$ ) zwischen Vesikeln, die Gb3 enthalten ( $\text{GUV}^{+\text{Gb3}}$ ), oder Vesikeln ohne Gb3-Rezeptoren ( $\text{GUV}^{-\text{Gb3}}$ ) für Albumin-beschichtete Cantilever (B) und Lektin-beschichtete Cantilever (C). Die Sternchen weisen auf einen signifikanten Unterschied hin (T-Test; p-Wert <0,05). © Synthetische Biologie von Signalprozessen Gruppe, Fakultät für Biologie, Freiburg.

## Highlights

Wir beobachteten spezifische Wechselwirkungen zwischen Lektin-beschichteten und Gb3-enthaltenden Vesikeln. Die Berechnung des Trennarbeitswertes für zwei Gruppen von Vesikeln zeigte einen signifikanten Anstieg für LecA-beschichtete Cantilever-Wechselwirkung mit Gb3-enthaltenden Vesikeln verglichen mit nicht-Gb3-enthaltenden Vesikeln (Abbildung 3C).

Durch Untersuchung komplexerer, synthetischer Systeme wie von GUVs mit Phasenseparation (ähnelt lipid rafts), oder eines Aktin-Gerüsts innerhalb der GUVs wird die Aufklärung des biophysikalischen Mechanismus der Lektin-getriebenen Phagozytose erleichtert.

- [1] R.T. Sadikot, T.S. Blackwell, et al., *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 171, 1209–1223 (2005).
- [2] S. Tollis, A.E. Dart, et al., *BMC Syst. Biol.*, 4, 149 (2010).
- [3] C. Chemaní, A. Imberty, et al., *Infect. Immun.*, 77, 2065–2075 (2009).
- [4] T. Eierhoff, B. Bastian, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 111, 12895–12900 (2014).
- [5] W. Römer, L. Berland, et al., *Nature*, 450, 670–675 (2007).
- [6] R. Rounsevell, J.R. Forman, et al., (2004).
- [7] J. Sotres, A. Lostao, et al., *ChemPhysChem*, 9, 590–599 (2008).
- [8] R. Omidvar, M. Tafazzoli-shadpour, et al., *J. Biomech.*, 47, 3373–3379 (2014).
- [9] S. Vichare, S. Sen, et al., *Soft Matter*, 10, 1174–81 (2014).
- [10] J. Madl, S. Villringer, et al., Springer Protocols, (n.d.), DOI:10.1007/8623\_2016\_7.
- [11] J. Friedrichs, J. Helenius, et al., *Nat. Protoc.*, 5, 1353–1361 (2010).

## Energetic investigations of induced particle uptake into functionalized synthetic membrane systems

R. Omidvar<sup>1, 2,3</sup>, J. Madl<sup>1,2,3</sup> and W. Römer<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Biology, Albert-Ludwigs-University Freiburg, <sup>2</sup>Center for Biological Signaling Studies (BiOSS), Albert-Ludwigs-University Freiburg, <sup>3</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

Project funding: German Research Foundation (DFG RO 4341/3-1)

Project starting date: June 2016

The study represents an interdisciplinary research project based on the collaboration of biologists/biophysicists of the Synthetic Biology of Signalling Processes Group from the Faculty of Biology, University of Freiburg (PI: Jun.-Prof. Dr. Winfried Römer) with physicists from the Bio- and Nano-Photonics Research Group from the Department of Microsystems Engineering (IMTEK), University of Freiburg (PI: Prof. Dr. Alexander Rohrbach).

Pathogenic bacteria like *Pseudomonas aeruginosa* (PA) can cause infections and diseases especially in immunocompromised patients [1]. Binding of pathogens to specific host cells is the first step of the infection mechanism. Thereafter, the cell membrane can be deformed in a way to first wrap and further on absorb the bacterium into its cellular cytoplasm. Cell membrane deformation for particle-induced invagination is also crucial in other biological phenomena such as viral infection or micro drug carriers [2].

In case of PA, it has been demonstrated that bacterium engulfment is mostly initiated by specific ligand-receptor interactions followed by membrane deformation and subsequent reorganization of intercellular constituents e.g. actin cortex [2]. PA bacteria implement their superficial lectin molecules as ligands to bind to the glycosphingolipid receptors on the cell surfaces [3].

The previous work of our lab could interestingly show that specific binding of the bacterial

lectin LecA with the glycolipid globotriaosylceramide (Gb3) is fully sufficient to induce bacterial engulfment into Giant Unilamellar Vesicles (GUVs) as a minimal model of the cell membrane. It indicates the importance of ligand-receptor interaction that can lead to engulfment even in a synthetic system having neither actin cortex nor other active endocytic cell machineries [4]. Gb3 is also targeted by other bacterial toxin subunits e.g. Shiga toxin from *Shigella dysenteriae* bacterium [5]. Due to the importance of specific ligand-receptor for proper engulfment, we decided to investigate the physical interaction of a ligand-coated particle resembling the polar region of the PA bacterium and receptor-containing synthetic lipid bilayer system. This study will enable us to gain a deeper understanding of the essential mechanisms which are driving particle and especially bacteria uptake processes into biological cells.

To quantify the physical interactions, we use Atomic Force Microscopy (AFM) to measure the interacting forces between LecA-coated spherical probes and Gb3-containing GUVs. AFM has shown its great power for measuring the physical forces in various biological applications e.g. protein domains unfolding [6], single ligand-receptor bond unbinding [7] and detachment of single cells from another cell [8] or from a substrate [9]. A microbeam called cantilever is positioned over the sample far from the surface and moved downward until it touches the sample surface at one point and pushes the point downward. The probe can be immediately or after a particular time retracted from the surface till complete separation from the surface occurs again. During this cycle, the vertical deflection of the cantilever is recorded precisely via a laser detection system and thereafter converted to the force using Hooke's law. Figure 1 shows a schematic view of the GUV and LecA-coated probe.

GUVs were prepared using the electroformation method as comprehensively described in this protocol [10]. The vesicle membrane contained 1,2-Dioleoyl-sn-glycero-3-phosphocholine (DOPC), Cholesterol, Gb3, FSL-Biotin and TR-DHPE (59.5:30:5:5:0.5). To avoid lateral movement of vesicles while the AFM cantilever applies a force on them, we chemically

immobilized the GUVs on the substrate. FSL-Biotin molecules had been added to the GUVs in order to adhere to an avidin or streptavidin functionalized substrate. To prepare a functionalized substrate, 22 mm diameter round glass coverslips were first sonicated in Ethanol solution (50% v:v), then washed in distilled water, followed by sonication in sodium hydroxide solution and washing in distilled water. They could be stored in distilled water for several days. Prior to the experiment, the coverslip's surface was dried under  $N_2$  stream and was first passivated by biotin-conjugated bovine serum albumin (BSA, 0.1 mg/ml) solution for min. 2 hours, and then followed by streptavidin incubation (0.1 mg/ml in PBS) for 30 minutes. Figure 2 shows an immobilized GUV on a streptavidin-functionalized coverslip.

After washing in PBS, the functionalized substrate was mounted on a JPK coverslip holder. The holder was filled with fresh PBS solution and about 1  $\mu$ l of GUV solution was added. Before probe functionalization with the lectin molecules, we tested the interaction forces between GUVs and albumin-coated colloidal probes (silicon dioxide spheres with a diameter of 0.8  $\mu$ m). Cantilevers were cleaned by plasma cleaning treatment and then incubated in a 50  $\mu$ l droplet of albumin solution (0.1 mg/ml) at 37 °C overnight. Beside above-mentioned vesicles exposing Gb3 receptor molecules ( $GUV^{+Gb3}$ ), we also tested vesicles, which did not contain Gb3 molecules ( $GUV^{-Gb3}$ ). The JPK Cellhesion 200 system was used to apply low force values (about 100 pN) and slightly indent vesicles. Vertical deflection (or force) versus indentation depth curves were recorded and the retract part of the curves (red curve) were analyzed (Fig. 3A). The results illustrated non-specific interactions of albumin-coated cantilevers with GUVs whether they contained Gb3 or not. Several vesicles were examined and several curves were recorded on each single vesicle. The hatched area in Fig. 3A that is enclosed by the retract section of force-indentation curve called detachment work ( $W_D$ ) is the work that is required to detach the cantilever from the membrane and can be used to describe the adhesion strength between coated cantilevers and the membrane. As indicated in Fig. 3B,

## Highlights

there is no significant difference for detachment work values between two different kinds of vesicles.

To functionalize the cantilevers with lectin proteins, they were cleaned in a similar way and were incubated in a 50  $\mu\text{l}$  droplet of biotin-BSA solution (0.1 mg/ml) at 37°C overnight. After 3x washing cantilevers by submerging them in PBS, they were placed in a 50  $\mu\text{l}$  droplet of Streptavidin solution (0.1 mg/ml) for 30 minutes. After repeating the washing step, they were placed in biotinylated-LecA solution (0.1 mg/ml) for another 30 minutes. They were washed again and could be stored in PBS at 4°C for some days [11]. Using similar conditions that have been set up for albumin-coated cantilevers, the force-indentation curves were recorded for lectin-coated cantilevers.

We observed specific interactions between lectin-coated and Gb3-containing vesicles. Calculating the detachment work for two groups of vesicles showed a significant increase for LecA-coated cantilever interaction with Gb3-containing vesicles compared to non-Gb3-containing vesicles (Fig. 3C).

Studying more complex synthetic systems such as GUVs with phase-separation (resembling lipid rafts) or actin shells inside the GUV can better elucidate the biophysical mechanism underlying lectin-driven phagocytosis.

Fig. 1: A GUV containing the Gb3 receptor interacts with a LecA functionalized AFM probe. © Synthetic Biology of Signalling Processes Group, Faculty of Biology, Freiburg.

Fig. 2: Confocal microscopy image of a biotin-containing GUV attached to the streptavidin coated substrate. The equatorial xy plane (I) and the two cross sections (yz (II) and xz (III)) are shown. © Synthetic Biology of Signalling Processes Group, Faculty of Biology, Freiburg.

Fig. 3: (A) Representative force-indentation curves for albumin-coated cantilevers on a vesicle (whether containing Gb3 or not). Comparison of the detachment work ( $W_D$ ) between vesicles containing Gb3 (GUV<sup>+Gb3</sup>) and vesicles without Gb3 receptors (GUV<sup>-Gb3</sup>) for albumin-coated cantilevers (B) and lectin-coated cantilevers (C). Asterisks show the significant difference (T-test; p-value < 0.05).

## ENERGIEAUTARKE (MIKRO-SYSTEME) / BIOMIMETIC AND BIO-BASED MATERIALS

### Modeling Advanced Optics of Perovskite Silicon Solar Cells and Modules

N. Tucher<sup>1, 2</sup>, S. W. Glunz<sup>1, 2</sup>, J. C. Goldschmidt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Photovoltaic Energy Conversion, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH), Universität Freiburg, <sup>2</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT), <sup>3</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektvorhaben: „Fortgeschrittene Optik für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen“ (Oposit)

Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen haben durch bessere Ausnutzung des einfallenden Sonnenspektrums im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik, den reinen Silizium Solarzellen, ein Wirkungsgradpotential von >30% [1].

Nach großen Fortschritten innerhalb der letzten Jahre erreichen experimentell hergestellte 2-Terminal Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen bereits Wirkungsgrade von bis zu 23,6% [2]. Optische Verluste sind eine wesentliche Limitierung auf dem Weg zu höheren Wirkungsgraden: parasitäre Absorption im Lochtransportmaterial und, insbesondere bei planer Zellstruktur, Reflexionsverluste an der Vorderseite. Die Integration von Mikrostrukturen an der Vorderseite der Zelle kann die Reflexion verringern und an der Rückseite die Light Trapping-Eigenschaften verbessern.

Für die Modellierung der optischen Eigenschaften von Tandem Solarzellen wurde der OPTOS-Formalismus verwendet [3] und entsprechend der Anforderungen modifiziert. Der Simulationsablauf beginnt mit der Bestimmung der Licht-Umverteilungseigenschaften der einzelnen Grenzflächen. Anschließend werden diese in einem Matrix-basierten Verfahren effizient kombiniert und Reflexion, Transmission und die Absorption jeder einzelnen Schicht im System bestimmt.

Ein Beispielsystem, das mit OPTOS modelliert wurde, ist in Abbildung 1a dargestellt. Die pyramidale Vorderseite verringert die Reflexion und verlängert Lichtwege in der Silizium Solarzelle.

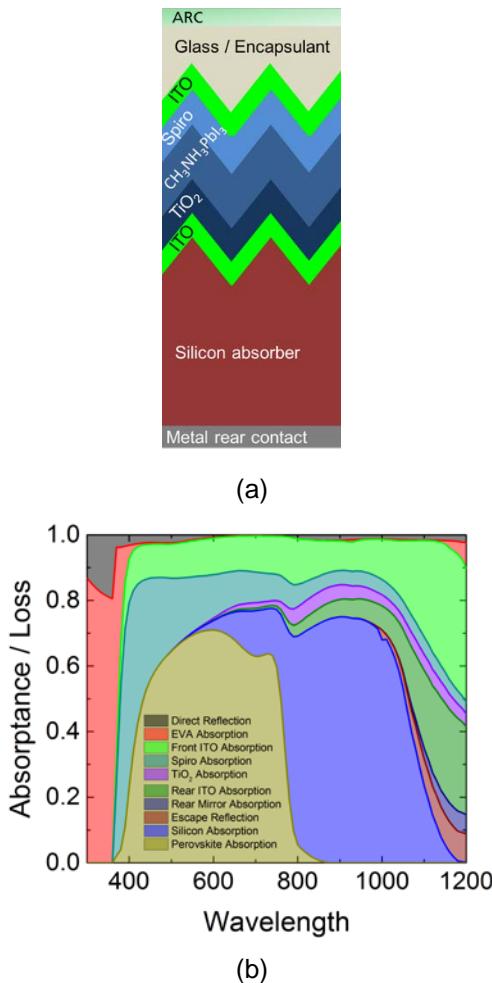


Abb. 1: a) Schematische Darstellung einer Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle inklusive Modulverkapselung. Die Zufallspyramiden an der Vorderseite sorgen für eine Verringerung der Reflexion. b) Verlustanalyse einer verkapselten Tandemsolarzelle, die hohe parasitäre Lochtransportmaterial und in der verwendeten ITO Schicht zeigt. © Laboratory for Photovoltaic Energy Conversion, University Freiburg

Abbildung 1b zeigt eine Verlustanalyse des beschriebenen Systems. Die Schichtdicken der Perowskit-Solarzelle entsprechen typischen experimentellen Systemen, sind aber noch nicht optimiert. Daher sind die erreichten Photoströme noch gering und der resultierende Wirkungsgrad ist im Vergleich zu aktuellen Silizium-Solarzellen kleiner. Dies ist

hauptsächlich auf die hohe parasitäre Absorption im Lochtransportmaterial und in der verwendeten ITO-Schicht zurückzuführen. Erste Ansätze deren Schichtdicken zu reduzieren und mit einem evolutionären Algorithmus zu optimieren zeigen eine deutlich höhere Absorption in der Perowskit Schicht und im Silizium, was zu höheren Wirkungsgraden führt.

Sobald der Schichtstapel für plane und texturierte Zellen optimiert ist, kann die Absorption für verschiedene Einfallwinkel mit geringem Rechenaufwand bestimmt werden, einer der großen Vorteile des OPTOS-Formalismus. Das ist insbesondere für Ertragsanalysen relevant, da sich die Richtung der Sonneneinstrahlung während des Tages und über das Jahr ändert. Ertragsanalysen von Perowskit-Tandemsolarzellen unter Berücksichtigung der Modulverkapselung sind ein geeignetes Mittel für den Vergleich mit reinen Silizium Solarzellen als aktuellem Stand der Technik.

- [1] M. T. Hörantner and H. Snaith, Energy Environ. Sci. (2017).
- [2] K. A. Bush et al., Nature Energy 2, 17009 (2017).
- [3] N. Tucher et al., Opt. Express 24, A1083 (2016).

## Modeling Advanced Optics of Perovskite Silicon Solar Cells and Modules

N. Tucher<sup>1, 2</sup>, S. W. Glunz<sup>1, 2</sup>, J. C. Goldschmidt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Photovoltaic Energy Conversion, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INA-TECH), Universität Freiburg, <sup>2</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT), <sup>3</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)

Funding: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektvorhaben: „Fortgeschrittene Optik für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen“ (Oposit)

Perovskite silicon tandem solar cells have the potential for efficiencies >30% [1] due to an improved use of the incident solar spectrum compared to the state of the art silicon single-junction solar cells. After rapid progress over the last years 2-terminal perovskite on silicon tandem devices have achieved efficiencies up

## Highlights

to 23.6% [2]. Optical losses are a major factor limiting the efficiency: parasitic absorption in the hole transport material and especially for planar cell structures also reflection losses can play a role. Front side structures can be integrated to reduce surface reflection, rear side structures to improve the light trapping of the silicon cell.

To model the optical properties of the tandem structure, we modified and improved the OPTOS-formalism [3]. The OPTOS simulation procedure starts by calculating the properties of the individual interfaces with the most appropriate method. Subsequently the different light redistribution properties are efficiently combined in a matrix-based calculation and result in reflectance, transmittance and absorptance of the system. Recent developments enable determining the absorptance in a thin layer stacks integrated in the interfaces, such as the perovskite absorber layer.

An exemplary system that can be modeled with adapted OPTOS formalism is displayed in Figure 1a. The pyramidal front side texture reduces reflectance and increases the pathlength of the light within the silicon.

Figure 1b shows a loss analysis of the system described above. The layer thicknesses of the perovskite cell are typical for current experimental devices. The absorption in the individual sub-cells was calculated and converted into an achievable photo-current. As the layer thicknesses are not yet optimized, the achieved currents are still rather low and the total efficiency would be even below state-of-the-art silicon single junction solar cells. This is mainly due to parasitic absorption in the hole-conduction material and the applied ITO. First approaches to reduce the thickness of those layers and to optimize the stack based on an evolutionary algorithm show strongly increased absorption in the perovskite layer and in the silicon which leads to higher efficiencies.

Once the layer stack is optimized for planar as well as pyramidal front side, a great advantage of the OPTOS formalism is that the device current can be determined for different angles of incidence with very low computational resources. This is relevant for yield analyses as the angle of incidence of the solar irradiation

changes during the day and over a year. Such yield analyses of perovskite silicon tandem solar cells including the encapsulation to a photovoltaic module stack are a comprehensive measure for comparison with state-of-the-art silicon single-junction solar cells.

Fig. 1: a) Sketch of an encapsulated perovskite silicon tandem solar cell with random pyramids at the front side and planar rear side. b) Loss analysis for the encapsulated tandem cell shown above showing the high parasitic absorption in the hole-conducting layer and the ITO. © Laboratory for Photovoltaic Energy Conversion, University Freiburg

## Nanotomographische Untersuchung von Lithium-Luft-Batterien ( $\text{Li-O}_2$ )

Lili Liu<sup>1,2</sup> und Simon Thiele<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT); <sup>2</sup>Laboratory for MEMS Applications, IMTEK Department of Microsystems Engineering, University of Freiburg

Projektförderung: Humboldt Research Fellowship for Postdoctoral Researchers, Alexander von Humboldt (AvH) Foundation

Das Projekt beschäftigt sich mit der tomographischen Untersuchung von Lithium-Sauerstoff ( $\text{Li-O}_2$ ) Batterien. Mit dieser 3D-Technik soll der Zusammenhang zwischen der Morphologie der Elektroden und Massentransportprozessen in  $\text{Li-O}_2$  Batterien nach mehreren Arbeitszyklen aufgeklärt werden, um die zugrundeliegenden Degradationsmechanismen zu verstehen.

Die wieder aufladbare, nicht wasserhaltige Lithium-Luft-Batterie hat in den letzten Jahren schnell an Interesse gewonnen, da sie über eine sehr hohe intrinsische gravimetrische Energiedichte verfügt, die die von Li-Ion-Batterien bei weitem übersteigt [1]. Während des Entladevorgangs wird die Li-Metall-Anode der Batterie oxidiert und entlässt  $\text{Li}^+$  in den Elektrolyt.  $\text{O}_2$  aus der Luft dringt in die poröse Kathode ein und reagiert mit  $\text{Li}^+$ , um Lithiumperoxid ( $\text{Li}_2\text{O}_2$ ) zu bilden. Der Prozess wird während des Ladens umgekehrt [2]. Die Mikrostruktur der Kathode und insbesondere die morphologische Entwicklung des Entladeprodukts (üblicherweise  $\text{Li}_2\text{O}_2$ ) während des Betriebs der Batterie haben einen bedeutenden

Einfluss auf die Leistung der Li-O<sub>2</sub>-Batterie [3]. Traditionelle 2D-Messungen, beispielsweise per REM oder TEM, bieten nur begrenzte Informationen zur Morphologie der Kathoden-Oberfläche. Bis heute gibt es nur wenige Studien, die sich mit 3D-Untersuchungen der Elektroden für aprotische Li-O<sub>2</sub>-Batterien beschäftigen. Dieses Projekt zielt darauf ab, quantitative 3D-Tomographien einzusetzen, um „durch“ die gesamte Kathode einer gealterten Batterie zu blicken. Im Moment gibt es noch keine tomographischen Untersuchungen mit dieser Zielsetzung.

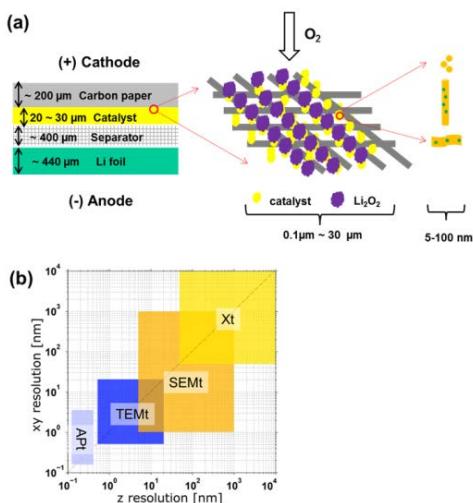


Abb. 1: (a) Elektrodenstruktur in einer Li-O<sub>2</sub>-Batterie und (b) Vergleich der Auflösungsskalen verschiedener tomographischer Techniken (APT: atom probe tomography, TEMt: transmission electron microscopy tomography, SEMt: scanning electron microscopy tomography, Xt: X-ray tomography). © Porous Media Group

Die Tomographie ist eine effektive Methode zur Rekonstruktion von 3D-Strukturen vom Nanometerbereich bis hin zur Zentimeter-Skala. Sie bietet eine quantitative Untersuchung der Morphologie sowie der morphologischen Veränderungen beim Betrieb der Batterie (inklusive Volumenänderung, Größenveränderung einzelner Bestandteile, Porosität, spezifische Oberfläche). Zudem erlaubt sie die Bestimmung von Transportparametern wie elektrische Leitfähigkeit und ionische Diffusivität [4].

Die Größe der aktiven Materialien sowie des Entladeprodukts Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wurde auf mehrere μm bis zu wenige nm bestimmt [5–8], weshalb FIB-SEM (focused ion beam scanning electron

microscopy) und Röntgentomographie ausgewählt werden, um die Elektrodenstruktur zu untersuchen (Abb. 1). Es wird erwartet, die folgenden drei Hauptfragen im Rahmen des Projekts zu beantworten:

- Wie verändert sich die Morphologie der Kathode einer aprotischen Li-O<sub>2</sub>-Batterie im Betrieb und bei Alterung?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen morphologischen Veränderungen und der Stromdichte von aprotischen Li-O<sub>2</sub>-Batterien?
- Wie können verschiedene Katalysatoren Alterungseffekte in aprotischen Li-O<sub>2</sub>-Batterien lindern, insbesondere durch morphologische Veränderungen?

Vor der Durchführung der tomographischen Analysen wurde eine systematische morphologische Untersuchung der Kathode als Funktion des Entladungsgrads (Set A) und der Stromdichte (Set B) mittels *ex-situ* REM durchgeführt. Die Kathoden degraderter Li-O<sub>2</sub>-Batterien wurden gesammelt und vor der REM-Messung gespült. Zwei Sets an Experimenten wurden wie folgt durchgeführt:

Set A: Drei Li-O<sub>2</sub>-Knopfzellen wurden zusammengesetzt und bei konstanter Stromdichte (0,05 mA cm<sup>-2</sup>) bis zu einer begrenzten Entladetiefe entladen (Abb. 2a). Gasdiffusionschichten (GDL Freudenberg H2315) ohne zusätzliche Beladung mit Katalysatoren wurden als Kathoden-Material ausgewählt (Abb. 2b). Bei der Begrenzung der Entladekapazität auf 1 mAh bildete sich auf der Faseroberfläche der Kathode teilweise ein klar definiertes ringförmiges Entladeprodukt mit Partikelgrößen von 2 bis 3 μm (Abb. 2c). Durch die Erhöhung der Kapazitätsgrenze auf 2 mAh formte sich mehr Entladeprodukt auf der Faseroberfläche, aber es blieb immer noch Platz für weitere Ablagerung. Die Partikelgrößen zeigen eine ungleichmäßige Verteilung (Abb. 2d). Sofern die Entladung der Batterie mit bis zu 2,0 V (etwa 3,2 mAh) durchgeführt wurde, bedeckte das Entladeprodukt die Faseroberfläche vollständig, ohne freie Flächen für eine zusätzliche Ablagerung. Die Partikelgrößen umfassen nach wie vor einen weiten Bereich (Abb. 2e).

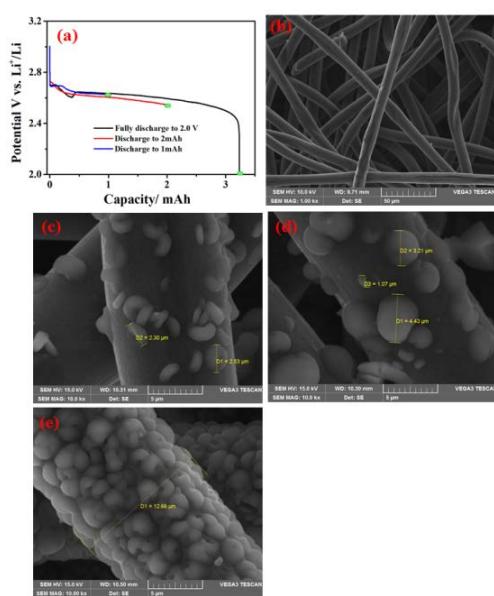


Abb. 2: (a) Entladekurven mit verschiedenen Entladetiefen bei einer Stromdichte von  $0,05 \text{ mA cm}^{-2}$ , REM-Bilder von (b) einer neuen Kathode, (c) einer Kathode mit einer Entladekapazität von  $1 \text{ mAh}$ , (d) einer Kathode mit einer Entladekapazität von  $2 \text{ mAh}$  und (e) einer Kathode nach einer Entladung bis  $2 \text{ V}$  (gegen  $\text{Li}^+/\text{Li}$ ). © Porous Media Group

Set B: Zwei Li-O<sub>2</sub>-Knopfzellen wurden zusammengebaut und bei Stromdichten von  $0,2 \text{ mA cm}^{-2}$  und  $2 \text{ mA cm}^{-2}$  bis  $2 \text{ V}$  entladen (Abb. 3a). Gasdiffusionsschichten (GDL Freudenberg H14C7) wurden ohne weitere Katalysator-Beladung als Kathoden-Material gewählt (Abb. 3b). Ringförmige Entladeprodukte mit Partikelgrößen von  $3$  bis  $4 \mu\text{m}$  bildeten sich auf der Oberfläche der Kathode (Abb. 3c). Bei Erhöhung der Stromdichte auf  $2 \text{ mA cm}^{-2}$  entstanden wesentlich dünnerne Produkte mit mehrschichtiger Struktur und einer Größe von weniger als  $1 \mu\text{m}$  (Abb. 3d).

FIB-SEM-Untersuchungen der entladenen Kathode wurden bereits durchgeführt, jedoch waren diese ersten Experimente nicht erfolgreich, da das ringförmige Entladeprodukt zu empfindlich ist, um seine Struktur unter dem Einfluss des Ionenstrahls zu erhalten. Die Partikel fielen während des Schneidevorgangs mit dem fokussierten Ionenstrahl schrittweise in sich zusammen. In Zukunft wird an der Ablagerung einer schützenden Schicht auf der Probe gearbeitet, um das Entladeprodukt unter dem Ionenstrahl zu stabilisieren.

In Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin sind zudem Röntgentomographien am Synchrotron (BAMline BESSY II) geplant. Hierfür wird ein neues, selbst entwickeltes und gebautes Batteriedesign zur *in operando* Untersuchung einer Li-O<sub>2</sub>-Batterie per Röntgentomographie eingesetzt, um das Zerlegen der Batterie zu vermeiden.

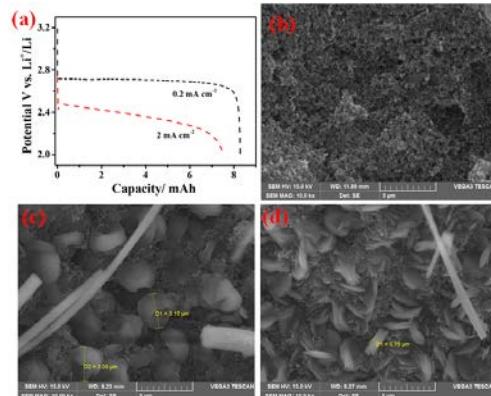


Abb. 3: (a) Entladekurven mit verschiedenen Stromdichten, REM-Bilder von (b) einer neuen Kathode, (c) einer Kathode mit einer Stromdichte von  $0,2 \text{ mA cm}^{-2}$ , (d) einer Kathode mit einer Stromdichte von  $2 \text{ mA cm}^{-2}$ . © Porous Media Group

- [1] M. M. Ottakam Thotiyil, S. A. Freunberger, Z. Peng, Y. Chen, Z. Liu, P. G. Bruce, Nat. Mater. 12 (2013) 1050-1056
- [2] L. L. Liu, J. Wang, Y. Y. Hou, J. Chen, H.-K. Liu, J. Z. Wang, Y. P. Wu, Small, 12 (2016) 602-611
- [3] L. Zhong, R. R. Mitchell, Y. Liu, B. M. Gallant, C. V. Thompson, J. Y. Huang, S. X. Mao, Y. Shao-Horn, Nano lett., 13 (2013) 2209-2214
- [4] L. Zielke, T. Hutzenlaub, D. R. Wheeler, C.-W. Chao, I. Manke, A. Hilger, N. Paust, R. Zengerle, S. Thiele, Adv. Energy Mater. 5 (2015) 1401612
- [5] R. R. Mitchell, B. M. Gallant, C. V. Thompson, S. H. Yang, Energ. Environ. Sci. 4 (2011) 2952-2958
- [6] J. J. Xu, Z. L. Wang, D. Xu, L. L. Zhang, X. B. Zhang, Nat. Commun. 4 (2013) 2438-3438
- [7] Y. Yu, B. Zhang, Y.-B. He, Z.-D. Huang, S.-W. Oh, J.-K. Kim, J. Mater. Chem. 1 (2013) 1163-1170
- [8] B. D. Adams, C. Radtke, R. Black, M. L. Trudeau, K. Zaghib, L.F. Nazar, Energ. Environ. Sci. 6 (2013) 1772-1781

## Nanotomographic investigation of Lithium-Air (Li-O<sub>2</sub>) batteries

Lili Liu<sup>1,2</sup> and Simon Thiele<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bio-inspired Technologies (FIT) and <sup>2</sup>Laboratory for MEMS Applications, IMTEK Department of Microsystems Engineering, University of Freiburg

Project funding: Humboldt Research Fellowship for Postdoctoral Researchers, Alexander von Humboldt (AvH) Foundation

This project intends to investigate lithium-oxygen (Li-O<sub>2</sub>) batteries by tomography. With this 3D technique, we will develop an understanding of the relation between electrode morphology and mass transportation processes in Li-air batteries upon cycling to understand degradation mechanisms.

The rechargeable non-aqueous lithium-oxygen (Li-O<sub>2</sub>) battery expanded rapid interest in recent years due to its intrinsically very high theoretical gravimetric energy density that far exceeds that of Li-ion batteries [1]. During battery discharge, the Li-metal anode is oxidized, releasing Li<sup>+</sup> into electrolyte. O<sub>2</sub> from the air enters the porous cathode and reacts with Li<sup>+</sup> to form lithium peroxide (Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). The process is reversed during charging [2]. The micro structure of the cathode and especially the morphological evolution of the discharge product (usually Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) during the battery operation have a pronounced influence on the Li-O<sub>2</sub> battery performance [3]. Traditional 2D measurements e.g. by SEM or TEM only provide limited morphological information on the cathode surface. To date, there have been rather few studies of 3D investigations on electrodes for aprotic Li-O<sub>2</sub> battery. This project aims to use quantitative 3D tomography analysis to “see through” the whole cathode upon battery aging. In particular, there has been no tomographic investigation on it.

Tomography is an effective method for the reconstruction of 3D structures from the nanometer scale to the centimeter scale. It provides quantitative analysis of morphology and morphological changes during battery operation (including volume change, feature size, porosity, specific surface area). Also, it allows

to access transport parameters, such as electrical conductivity and ionic diffusivity [4].

The size of the active materials and the discharge product Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> are reported to be several μm to several nm [5-8], so the FIB-SEM (focused ion beam scanning electron microscopy) tomography and X-ray tomography will be selected in monitoring the electrode structure, as shown in Fig. 1. Three key questions are expected to be addressed in the framework of this project.

- How does the aprotic Li-O<sub>2</sub> battery cathode morphology change during cycling and ageing?
- What is the relationship between morphology changes and current densities in aprotic Li-O<sub>2</sub> batteries?
- How can different electrocatalysts mitigate ageing effects in aprotic Li-O<sub>2</sub> batteries, in particular by morphology changes?

Prior to carry out tomography tests, a systematic morphological investigation of the cathode as a function of discharge depth (set A) and current density (set B) was performed via ex-situ SEM. Cathodes were collected from the degraded Li-O<sub>2</sub> batteries and rinsed before SEM measurement. Two sets of experiments have been done as follows:

Set A: Three Li-O<sub>2</sub> coin cells were assembled and discharged to limited discharge depths at a constant current density (0.05 mA cm<sup>-2</sup>) (Fig. 2a). Gas diffusion layer (GDL Freudenberg H2315) was chosen as cathode material without further catalyst loading (Fig. 2b). When discharge capacity was limited to 1 mAh, well-defined toroidal-shaped discharge product with particle size ranging from 2 to 3 μm partially formed on the cathode fiber surface (Fig. 2c). By increasing the capacity limitation to 2 mAh, more discharge product formed on the fiber surface, but still there was space to allow for an additional deposition. The particle size shows a non-uniform distribution (Fig. 2d). When the battery discharge was performed up to 2.0 V (approx. 3.2 mAh), the discharge product fully covered the fiber surface,

## Highlights

with no space for further deposition. The particle size still shows a large distribution range (Fig. 2e).

Set B: Two Li-O<sub>2</sub> coin cells were assembled and discharged to 2V at current densities of 0.2 mA cm<sup>-2</sup> and 2 mA cm<sup>-2</sup>, respectively (Fig. 3a). A gas diffusion layer (GDL Freudenberg H14C7) was chosen as cathode material without further catalyst loading (Fig. 3b). Toroidal-shaped discharge products with particle sizes ranging from 3 to 4 µm formed on the cathode surface (Fig. 3c). When enlarging the current density to 2 mA cm<sup>-2</sup>, much thinner, layered structured products appeared, with a thickness of less than 1 µm. (Fig. 3d).

We carried out FIB-SEM experiments on the discharged cathode. These first experiments were not successful since the toroidal-shaped discharge product was too sensitive to maintain its structure under the ion beam. The particles gradually collapsed during focused ion beam cutting. In the future we will try to pursue the deposition of a protective layer on the discharge product to stabilize it under the ion beam cutting.

Also X-ray synchrotron tomography experiments together with Helmholtz-Zentrum Berlin (BAMline at Bessy II) are planned. A new homemade Li-O<sub>2</sub> battery device for in operando synchrotron X-ray tomography imaging has been designed to avoid dissembling the battery.

Fig. 1. (a) Electrode structure in a Li-O<sub>2</sub> battery and (b) Resolution comparison of different tomography methods (APt: Atom Probe tomography, TEMt: Transmission electron microscopy tomography, SEMt: Scanning electron microscopy tomography, Xt: X-ray tomography). © Porous Media Group

Fig. 2 (a) Discharge plots with different discharge depth at a current density of 0.05 mA cm<sup>-2</sup>, SEM images of (b) pristine cathode, (c) cathode with discharge capacity of 1mAh, (d) cathode with discharge capacity of 2 mAh, and (e) cathode with discharge to 2 V(vs. Li<sup>+</sup>/Li). © Porous Media Group

Fig. 3 (a) Discharge plots with different current densities, SEM images of (b) pristine cathode, (c) cathode with a current density of 0.2 mA cm<sup>-2</sup>, (d) cathode with current density of 2 mA cm<sup>-2</sup>. © Porous Media Group

## Entwicklung eines Protokolls für hochauflösende Röntgentomographie zur Charakterisierung der Sonden-Gewebe-Interaktion implantierter passiver Cortex-Sonden in Ratten

Thomas Böhm<sup>1,2</sup>, Kevin Joseph<sup>3</sup>, Riko Moroni<sup>1,2</sup>, Matthias Kirsch<sup>4</sup>, Ulrich G. Hofmann<sup>3</sup>, André Hilger<sup>5</sup>, Ingo Manke<sup>5</sup>, Simon Thiele<sup>1,2,6,7,8</sup>

<sup>1</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT); <sup>2</sup>Laboratory for MEMS Applications, IMTEK Department of Microsystems Engineering, University of Freiburg;

<sup>3</sup>Neuroelectronic Systems, Dept. of Neurosurgery, Faculty of Medicine, University Medical Center;

<sup>4</sup>Institute of Anatomy and Cell Biology, Dept. of Neuroanatomy, Faculty of medicine, University of Freiburg; <sup>5</sup>Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy, Berlin; <sup>6</sup>Forschungszentrum Jülich GmbH, Helmholtz-Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energy (IEK11), Forschungszentrum Jülich, Erlangen; <sup>7</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; <sup>8</sup>Hahn-Schickard

Projektförderung: Exzellenzcluster Brainlinks-Braintools, Projekt CAPRI

Neurowissenschaft beruht auf der Analyse von Gehirngewebe mit einer Auflösung von unter einem Mikrometer. Obwohl einzelne Neurone und Gliazellen diese Größenskala überschreiten, finden die interessantesten Interaktionen im Gehirn unterhalb dieser Größenordnung statt. Das Projekt CAPRI (characterisation of probe interactions with brain tissue) beschäftigt sich mit der Analyse der Interaktionen zwischen Gehirngewebe und implantierten Sensoren. Zur Untersuchung der langfristigen Effekte nach der Implantation eines Sensors in Cortex-Gewebe werden tomographische Techniken benötigt, die große Gewebevolumina mit einer hohen Auflösung darstellen können.

Tomographische Darstellungsmethoden können grundsätzlich in physisches oder virtuelles Schneiden, die Abbildung dieser Schnitte sowie die nachfolgende 3D-Rekonstruktion der Bilderstapel unterteilt werden. Während physisches Schneiden üblicherweise eine höhere räumliche Auflösung als virtuelles Schneiden erlaubt, sind die hierfür eingesetzten Techniken aufwändiger und anfällig für

Schneideartefakte. Zudem zerstört physisches Schneiden unweigerlich die zu untersuchende Probe, weshalb der Einsatz korrelativer bildgebender Verfahren schwierig bis unmöglich wird.

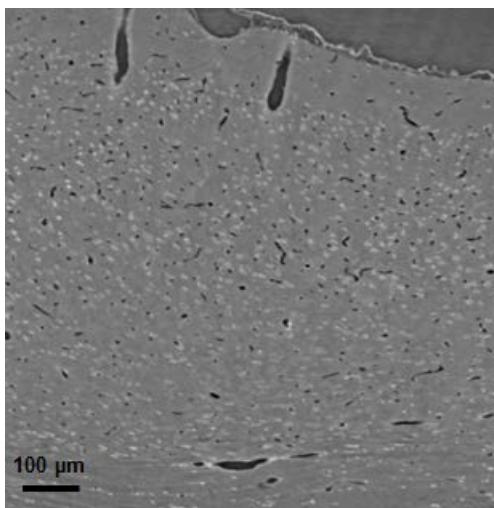


Abb. 1: Rattencortex, einzelnes Schnittbild einer hochauflösenden Röntgentomographie (© Porous Media Group).

Die bekanntesten Tomographie-Techniken zur Untersuchung von Gehirngewebe, die auf virtuellem Schneiden basieren, sind die Magnetresonantomographie (MRT) und die Computertomographie (CT). Beide Methoden erlauben die Erfassung großer Gewebevolumina und können sogar mit geringen bis keiner Folgeschäden am lebenden Organismus durchgeführt werden. Jedoch erreichen diese Verfahren nicht die benötigte räumliche Auflösung zur Darstellung einzelner Zellen.

Physisches Schneiden gefolgt von lichtmikroskopischen Aufnahmen wird seit langem in der Histologie eingesetzt, allerdings meist auf einzelnen Schnitten, da das Sammeln von Schnittfolgen und die 3D-Rekonstruktion von Bildfolgen schwierig, zeitaufwändig und rechenintensiv ist. Mit der Einführung des Konfokalmikroskops wurde es möglich, einzelne Zellen spezifisch mit Fluoreszenzfarbstoffen zu markieren und mehrere Mikrometer dicke Gewebeschnitte dreidimensional abzubilden. Neue Entwicklungen in diesem Feld beinhalten MOST (Micro-Optical Sectioning Tomography) und das ATUMtome (Automated Tape Collecting Ultramicrotome). Mithilfe von

MOST wurde ein vollständiges Mausgehirn bei einer Voxelgröße von  $1 \mu\text{m}^3$  aufgenommen [1]. Dazu wurde das Gewebe eingebettet, gefärbt, anschließend automatisch geschnitten und während des Schneideprozesses mit einem Mikroskop aufgenommen. So entsteht ein hochauflösender 3D-Datensatz des Gewebes – das aber während des Prozesses zerstört wird.

Mit dem ATUMtome werden Ultradünnschnitte einer eingebetteten Probe seriell auf einem Band gesammelt. Die Schnitte können anschließend gefärbt und mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht werden, womit eine herausragende räumliche Auflösung von bis zu 30 nm in Z-Richtung und weniger als 10 nm in der X-Y-Ebene erreicht wird [2]. Da diese Technik eine Weiterentwicklung der klassischen Array Tomographie darstellt, sind prinzipiell korrelative Aufnahmen per Licht- und Elektronenmikroskopie möglich. Das ATUMtome ermöglicht zwar hochauflösende Tomographien, begrenzt das zu untersuchende Gewebevolumen aber auf circa  $2 \text{ mm}^3$ . Die Aufnahmen nehmen außerdem viel Zeit in Anspruch und im Moment ist es aufgrund der benötigten Zeit und der Größe der Datensätze nicht möglich, das gesamte Volumen bei maximaler Auflösung aufzunehmen. Ähnliche Technologien wie SBF-SEM (Serial Block Face Scanning Electron Microscopy) und FIB-SEM (Focused Ion Beam SEM) haben dieselben Probleme, obwohl sich dieses Feld schnell weiterentwickelt.

Eine weitere Herausforderung für Tomographien von biologischem Gewebe ist die Anwesenheit von Fremdkörpern. Zur Erforschung von Gehirngewebe können Sensoren in das Gewebe implantiert werden, welche die Erfassung wertvoller Daten ermöglichen. Der Organismus reagiert aber mit Entzündungen und Vernarbungen auf die Sonden als Fremdkörper. Um das Sensordesign hinsichtlich einer minimalen Gewebeantwort zu optimieren, ist es notwendig, zunächst die Schnittstelle zwischen Sonde und Gewebe zu untersuchen. Da die Sonde potenziell für Probleme beim physischen Schneiden sorgt, können Forscher die Sensoren entweder vor einer Tomo-

## Highlights

graphie entfernen, was zu lokalen Gewebe-schäden führt, oder müssen Schneidearte-fakte aufgrund der Sonde in Kauf nehmen.

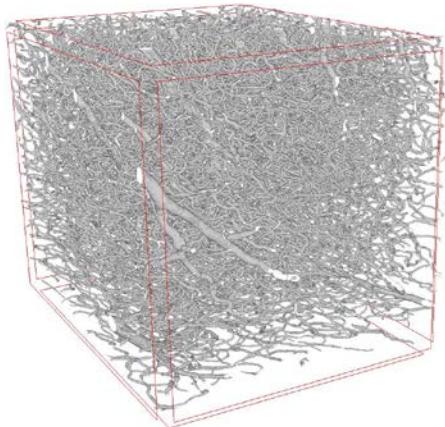


Abb. 2: 3D-Rekonstruktion der Gefäße in einer Rattencortex-Probe, aufgenommen mit hochauflösender Röntgentomographie (© Porous Media Group).

Um beide Fehlerquellen zu vermeiden, wurde ein Tomographie-Protokoll entwickelt, das auf virtuellem Schneiden des Gewebes basiert, aber dennoch die benötigte Auflösung von unter einem Mikrometer bietet. Es wird Röntgentomographie mit einer Synchrotron-Strahlenquelle bei einer Voxelgröße von unter 500 nm zur Abbildung von eingebettetem Gewebe ge-nutzt. Damit wird die Darstellung des Gewe-bes sogar mit implantierter Sonde ermöglicht und das maximale Volumen liegt bei mehr als 1 mm<sup>3</sup>. Da der gewebe-eigene Kontrast be-reits zur Unterscheidung von Zellen und Gefäß-en ausreicht, ist keine vorausgehende Kon-trastierung notwendig (Abbildungen 1 und 2). Zudem ist diese Tomographie deutlich schnel-ler als Verfahren, die auf physischem Schnei-den basieren. Durch das Stapeln von Tomo-grammen benachbarter Geweberegionen kann das aufgenommene Gewebevolumen noch weiter vergrößert werden. Da die Röntgentomographie das Gewebe nicht zerstört, sind zudem korrelative Abbildungsverfahren möglich.

Dieses Protokoll wird zur Analyse der lokalen Gewebe-Sonden-Interaktion von Sensoren auf Polyimid-Basis in Rattencortex-Gewebe eingesetzt werden. Die gewonnenen Daten sollen mit konfokaler Fluoreszenzmikroskopie

sowie REM-Aufnahmen von seriellen Schnittfolgen, die mit einem ATUMtome angefertigt werden, korreliert werden. Mit letzterem er-möglicht dieser Ansatz sogar, dasselbe Ge-webe an den gleichen Stellen mit zwei ver-schiedenen Techniken aufzunehmen. Damit können neue Erkenntnisse zur Gewebeverän-derung nach der Implantation einer Sonde ge-wonnen werden, auf verschiedenen Größens-kalen und mit komplementären bildgebenden Verfahren.

[1] A. Li *et al.*: Micro-Optical Sectioning Tomogra-phy to Obtain a High-Resolution Atlas of the Mouse Brain, *Science* 330 (2010) 1404-1408

[2] N. Kasthuri *et al.*: Saturated Reconstruction of a Volume of Neocortex, *Cell* 162 (2015) 648-661

## Development of a non-destructive high-resolution X-ray tomography protocol for investigating the brain-probe-interface in rat cortex with implanted passive sensors

Thomas Böhm<sup>1,2</sup>, Kevin Joseph<sup>3</sup>, Riko Moroni<sup>1,2</sup>, Matthias Kirsch<sup>4</sup>, Ulrich G. Hofmann<sup>3</sup>, André Hilger<sup>5</sup>, Ingo Manke<sup>5</sup>, Simon Thiele<sup>1,2,6,7,8</sup>

<sup>1</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bio-inspired Technologies (FIT); <sup>2</sup>Laboratory for MEMS Applications, IMTEK Department of Microsystems Engineering, University of Freiburg;

<sup>3</sup>Neuroelectronic Systems, Dept. of Neurosurgery, Faculty of Medicine, University Medical Center;

<sup>4</sup>Institute of Anatomy and Cell Biology, Dept. of Neuroanatomy, Faculty of medicine, University of Freiburg; <sup>5</sup>Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy, Berlin; <sup>6</sup>Forschungszentrum Jülich GmbH, Helmholtz-Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energy (IEK11), Forschungszentrum Jülich, Erlangen; <sup>7</sup>Department of Chemical and Biologi-cal Engineering, Friedrich-Alexander-Universi-tät Erlangen-Nürnberg; <sup>8</sup>Hahn-Schickard

Neuroscience relies on the analysis of brain tissue at sub-micron resolution. Although sin-gle neurons and glial cells exceed this length scale, the most interesting interactions in brain happen below this scale. The project CAPRI (characterization of probe interactions with brain tissue) focuses on the analysis of the interplay between implanted probes and brain tissue. The investigation of long-term effects upon sensor implantation in cortex tissue re-quires tomographic techniques that allow the

analysis of high tissue volumes at a high resolution.

Basically, data acquisition by tomography can be divided into physical and virtual sectioning, imaging of these sections, and subsequently the 3D reconstruction of image stacks. Whilst physical sectioning typically provides a higher spatial resolution than virtual sectioning, it is more laborious and prone to artifacts from the sectioning process. Also, physical sectioning is of destructive nature, which renders the application of correlative imaging methods difficult to impossible.

The most common virtual sectioning tomographic methods for the visualization of brain tissue are nuclear magnetic resonance imaging and computed tomography. Both techniques harbor the advantage of high-volume-imaging and can even be performed on living functional tissue with minor to no detrimental effect on the organism being investigated. However, they lack of the required resolution even for visualizing single cells.

Physical sectioning followed by lightmicroscopic imaging has been used for a long time in histology, however mostly on single sections since serial sectioning and volume reconstruction are difficult, time-consuming, and require high computing performance. With the introduction of confocal microscopy, specific fluorescent staining of cells of interest and 3D imaging of two-digit micron thick tissue sections became possible. Recent advancements in this field include Micro-Optical Sectioning Tomography (MOST) and the development of the automated tape collecting ultramicrotome (ATUMtome). With MOST, a complete mouse brain was imaged at a voxel size of  $1 \mu\text{m}^3$ . The tissue is embedded and stained for particular features, and it is subsequently automatically sliced into  $1 \mu\text{m}$  thin sections which are imaged by optical microscopy during cutting [1]. Thus, a high-resolution 3D data set of the tissue is created, yet the sample is irreversibly destroyed during the process.

Using the ATUMtome, serial ultra-thin sections of an embedded specimen are produced and collected on tape. The sections can be stained and imaged subsequently by scanning

electron microscopy (SEM), providing an outstanding spatial resolution of up to 30 nm in z-direction and less than 10 nm in the x-y-plane [2]. Since this method is a more sophisticated approach of the classical array tomography, correlative light- and electron microscopy are in principle feasible. While tomography based on sections generated with the ATUMtome is advantageous in terms of spatial resolution, the maximum volume that can be investigated is limited to approx.  $2 \text{ mm}^3$ . Also, imaging is very time consuming and at the moment it is impossible to image the complete volume at maximum resolution because of time and data size constraints. Similar technologies like SBF-SEM (serial block face SEM) and FIB-SEM (focused ion beam SEM) suffer from the same problems, although this field is fast progressing.

A further challenge for the tomography of biological tissue is the presence of foreign bodies. In order to investigate brain function, the implantation of sensors allows researchers to collect valuable data. Yet the body reacts to a probe as a foreign body, leading to inflammation and tissue scarring. For improving the probe design toward a reduced immune response it is necessary to study the local brain-probe-interface. Since the probe potentially interferes with physical sectioning processes, researchers can either remove the sensor prior to the imaging procedures, which leads to local tissue destruction, or have to accept cutting artifacts that may lead to reduced image quality.

To avoid both sources of error we developed a tomographic protocol that employs virtual sectioning of brain tissue, however at the required sub-micron spatial resolution. We use synchrotron X-ray imaging at a voxel size of less than 500 nm on resin-embedded tissue. This approach allows the analysis of tissue even with an implanted probe and spans a volume of more than  $1 \text{ mm}^3$ . Since the contrast provided by the tissue is already sufficient to discriminate cells and blood vessels, no staining is required (Figures 1 and 2). Furthermore, imaging can be performed much faster than tomography based on physical sectioning. Also, by generating tomograms of neighboring tissue areas, the investigated volume can be

## Highlights

increased simply by stacking the data sets. Since X-ray tomography does not destroy the sample, the data can be correlated with further imaging techniques that can be applied afterwards on the resin-embedded sample tissue.

We plan to use this tomography protocol for the analysis of local brain-probe-interactions with polyimide-based sensors implanted in rat brain cortex at different time intervals post implantation. Furthermore, we aim for combining these data with confocal fluorescence microscopy as well as high-resolution tomograms from SEM images of serial sections created with the ATUMtome. With the latter, even correlative imaging of the same area in the same samples is possible in concert with our X-ray tomography protocol, providing unprecedented insight into the local changes of brain tissue upon sensor implantation, at different resolution scales and with complementary imaging approaches.

Fig. 1: Rat brain cortex, single section of a high-resolution X-ray tomogram (© Porous Media Group).

Fig. 2: 3D-reconstruction of the vessels of a rat brain cortex sample after imaging with high-resolution X-ray tomography (© Porous Media Group).

## CORE FACILITY "MODELLIERUNG UND SIMULATION VON MATERIALSYSTEMEN" / "MODELLING AND SIMULATION OF MATERIALS SYSTEMS"

### Theoretische Erklärung der mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Spiropyrane

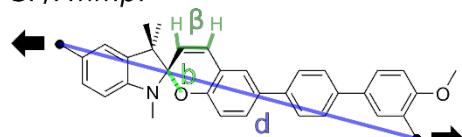
Oliver Brügner<sup>1</sup>, Michael Walter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT), <sup>2</sup>Fraunhofer IWM, Wöhlerstraße 11, D-79108 Freiburg

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) WA1687/9-1.

Die hier vorgestellte Studie beschäftigt sich mit farblosen Spiropyran-Molekülen, welche die Eigenschaft besitzen sich unter Krafteinwirkung zu verfärben. Die Spiropyrane können in Polymere eingebettet werden, um Kräfte, die auf die Polymere wirken, zu visualisieren. Dieser Effekt könnte in naher Zukunft für polymere Kraftsensoren verwendet werden, wobei dazu Spiropyrane benötigt werden, welche beim Nachlassen der Kraft schnell in die farblose Form zurückkehren was bei den üblicherweise verwendeten Spiropyranen nicht der Fall ist [1]. Die Energetik der Spiropyrane und damit auch die zur Verfärbung nötigen Kräfte sowie die Zeitkonstante der Entfärbung werden durch Substituenten stark beeinflusst [2].

a) SP/PmmpP



b) SP-NO<sub>2</sub>

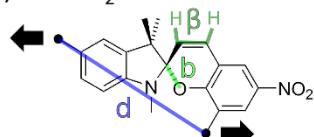


Abb. 1: Die Strukturformeln der berechneten Spiropyrane mit Definitionen des Abstands  $d$ , der Bindungslänge  $b$  und des Diederwinkels  $\beta$ . Die schwarzen Punkte mit den Pfeilen stellen die Atome dar, an denen die Kraft anliegt. Ein ähnliches Bild wurde schon veröffentlicht [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

Es stellt sich allerdings auch heraus, dass eine schnelle Entfärbungsreaktion mit größeren Kräften verknüpft ist. Fabian Kempe aus der experimentellen Gruppe von Michael Sommer von der TU Chemnitz ist es nun erstmals gelungen eine Folie aus Polymeren einer Spiropyranmodifikation zu erzeugen, die reißfest genug ist, um das Auftreten und Nachlassen von Kräften mit einer Verzögerung von weniger als einer Sekunde zu visualisieren. Um diese neuen experimentellen Ergebnisse besser zu verstehen, haben wir die Eigenschaften dieser Spiropyrane unter Einwirkung äußerer Kräfte mittels Berechnungen basierend auf der Dichtefunktionaltheorie untersucht [3].

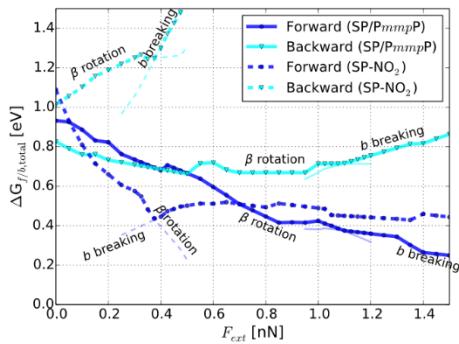


Abb. 2: Gesamtbarrieren für die Reaktion von der farblosen in die farbige Spiropyranform in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung in Abhängigkeit der externen Kraft  $F_{ext}$ . Es ist jeweils markiert, welche der beiden Übergänge ( $b$ -Brechung/ $\beta$ -Rotation) die Reaktionsgeschwindigkeit stärker beeinflussen, also den energetisch höheren Übergangszustand besitzen. Ein ähnliches Bild wurde schon veröffentlicht [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

Es wurden die zwei in Abb. 1 dargestellten Spiropyran-Modifikationen betrachtet. Dabei handelt es sich um das im Experiment verwendete Spiropyran welches in ein PmmpP Polymer eingebettet ist, und zum Vergleich um die in der Literatur sehr häufig verwendeten Nitro-Substitution (SP-NO<sub>2</sub>). Während die Kraft bei SP/PmmpP von der Benzopyranseite über die para-Substitutionsposition auf das Spiropyran übertragen wird, geschieht dies bei SP-NO<sub>2</sub> auf der gleichen Seite über die ortho-Position. Der Angriffspunkt der äußeren Kraft, sowie die Nitrogruppe machen also den wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Molekülen aus. Um die Kräfte zu simulieren, wurden die beiden Spiropyrane mit der sogenannten

COGEF Methode kontrolliert über den Abstand  $d$  auseinandergezogen. Dabei wird  $d$  schrittweise erhöht und jeweils die Struktur energetisch optimiert. Ab einer bestimmten Dehnung bricht die CO-Bindung in Spiropyran (zugehörige Bindungslänge  $b$  in Abb. 1).

Die Brechung dieser Bindung führt zur Verfärbung. Aus den Strukturen der COGEF Methode lässt sich dann zu jeder externen Kraft  $F_{ext}$  die Energiebarriere berechnen, die überwunden werden muss, um Spiropyran zu verfärben. Um diese Barrieren noch genauer zu bestimmen verwendeten wir eine zweidimensionale COGEF Methode, in der der Abstand  $d$  und die Bindungslänge  $b$  unabhängig voneinander variiert werden.

Da sich die farbige Spiropyranform erst durch die Rotation des Diederwinkels  $\beta$  (Abb. 1) stabilisiert, haben wir noch die dazugehörige zweite Barriere in Abhängigkeit von  $F_{ext}$  wieder mit einer zweidimensionalen COGEF Methode über die Kontrollparameter  $d$  und  $\beta$  bestimmt. Siehe FIT Report 2016 für mehr Details zu der Methode.

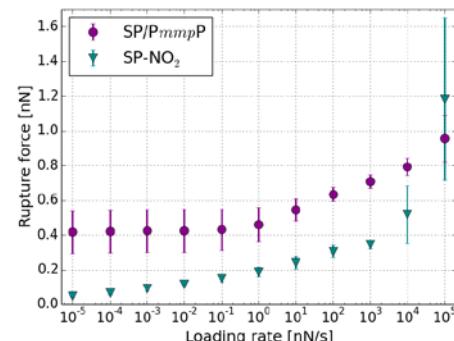


Abb. 3: Mittlere Kraft  $F_{rup}$ , bei der die Verfärbung stattfindet in Abhängigkeit der Kraftzunahme  $\alpha$ . Ein ähnliches Bild wurde schon veröffentlicht [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

Die Anwendung der Methode auf die beiden Spiropyrane aus Abb. 1 lieferte die in Abb. 2 dargestellten Gesamtbarrieren für die Verfärbungsreaktion in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung in Abhängigkeit von  $F_{ext}$ . Während für kleine  $F_{ext}$  der Übergang der  $\beta$ -Rotation die Gesamtbarriere definiert, ist es bei größeren  $F_{ext}$  der Übergang der  $b$ -Brechung. Um die mittlere Kraft  $F_{rup}$  zu berechnen, bei der die Verfärbung auftritt, wird angenommen, dass

## Highlights

die externe Kraft  $F_{\text{ext}}$  linear mit der Zeit ansteigt, also  $F_{\text{ext}} = \alpha t$  mit konstanter Kraftzunahme  $\alpha$  gilt. Damit lassen sich die Übergangsraten zu jedem Zeitpunkt aus den Barrieren berechnen und die Kräfte können über die Übergangswahrscheinlichkeiten gewichtet gemittelt werden (siehe FIT Report 2016).

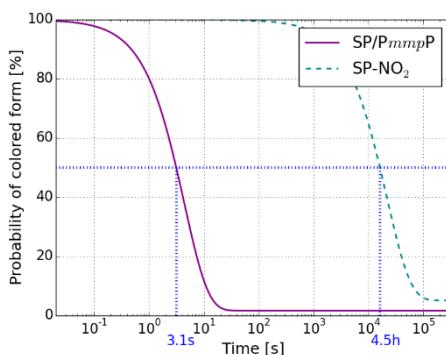


Abb. 4: Wahrscheinlichkeit der farbigen Spiropyranform in Abhängigkeit der Zeit ohne externe Kraft ausgehend von 100% farbiger Form. In blau sind die Halbwertszeiten angegeben. Ein ähnliches Bild wurde schon veröffentlicht [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

Die so berechneten mittleren Kräfte  $F_{\text{rup}}$  sind für die beiden Spiropyane in Abb. 3 in Abhängigkeit von  $\alpha$  dargestellt. Die Kraftzunahme wurde für das Experiment auf unter 1nN/s abgeschätzt [3], sodass sich also für SP/PmmpP im Vergleich zu SP-NO<sub>2</sub> eine mehr als doppelt so große Kraft aus Abb. 3 ablesen lässt. Dass die Verfärbung für SP/PmmpP erst bei einer größeren Kraft stattfindet, ist eine Folge der größeren Gesamtbarriere in Vorwärtsrichtung bis  $F_{\text{ext}} \approx 0.7 \text{nN}$  und der kleineren Gesamtbarriere in Rückwärtsrichtung (siehe Abb. 2). Dies erklärt warum für diese Art von Spiropyran eine reißfestere Polymerstruktur nötig ist, um eine Verfärbung zu erreichen [3]. Die Gesamtbarriere in Rückwärtsrichtung ist schon bei  $F_{\text{ext}} = 0$  für SP/PmmpP viel kleiner als für SP-NO<sub>2</sub>. Das führt zu dem im Experiment festgestellten Effekt, dass sich SP/PmmpP bei Nachlassen der Kraft viel schneller entfärbt, siehe Abb. 4. Folglich kann die Theorie die fast verzögerungsfreie Kraftvisualisierung aus dem Experiment bei Verwendung von SP/PmmpP erklären [3].

[1] D. A. Davis, A. Hamilton, J. Yang, L. D. Cremar, D. V. Gough, S. L. Potisek, M. T. Ong, P. V. Braun, T. J. Martinez, S. R. White, J. S. Moore, N. R. Sottos, *Nature* 459 (2009) 68–72

[2] Oliver Brügner, Thomas Reichenbach, Michael Sommer, Michael Walter, *J. Phys. Chem. A* 121 (2017) 2683–2687

[3] Fabian Kempe, Oliver Brügner, Hannah Buchheit, Sarah N. Momm, Felix Riehle, Sophie Hameury, Michael Walter, Michael Sommer, *Angew. Chem. Int. Ed.* 57 (2018) 997–1000

## Theoretical explanation for the mechanical properties of different spiropyrans

Oliver Brügner<sup>1</sup>, Michael Walter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Freiburg Center for Interactive Materials and Bio-inspired Technologies (FIT), <sup>2</sup>Fraunhofer IWM, Wöhlerstraße 11, D-79108 Freiburg

Project funding: German research foundation (DFG) WA1687/9-1.

The presented study deals with colourless spiropyran molecules which can switch to a coloured form when a force is applied. The spiropyrans can be incorporated in polymers in order to visualize forces which act on the polymers. This effect may be used for polymeric force sensors in the near future. This application needs spiropyrans which quickly return to the colourless form without force, which is not the case for the commonly used spiropyrans [1]. The energetics of the spiropyrans and the associated force needed for colouration as well as the time constant of the decolouration reaction are strongly influenced by substituents [2]. However, it was observed that a quick decolouration reaction is linked to larger forces. Fabian Kempe from the experimental group of Michael Sommer from the TU Chemnitz has succeeded for the first time in creating a film out of polymers with a spiropyran modification, which is sufficiently tear-resistant in order to visualize the appearance and disappearance of forces with a delay less than one second. In order to understand the new experimental results, we have investigated the properties of these spiropyrans under external force by calculations based on density functional theory [3].

Two spiropyran modifications were considered (fig. 1): the spiropyran used in the experiment which is incorporated in a PmmpP polymer and for comparison the nitro substitution ( $\text{SP-NO}_2$ ) commonly used in the literature. The force is transmitted from the benzopyran side via the para substitution position for SP/PmmpP and the ortho position for  $\text{SP-NO}_2$ . Hence, the pulling position and the nitro group are the main difference between both molecules. In order to simulate the forces, both spiropyrans were elongated with the so-called COGEF method controlled by distance  $d$  that is gradually increased while the structure energetically optimized for all other degrees of freedom. For a certain elongation, the CO bond in spiropyran breaks (associated bond length  $b$  in fig. 1). This bond breaking leads to the colouration. Using the structures from the COGEF method, the energy barrier associated to the colouration reaction of spiropyran can be calculated at each external force  $F_{\text{ext}}$ . We used a two-dimensional COGEF method which varies  $d$  and  $b$  independently to determine the barriers more precisely. As the coloured spiropyran form is only stabilised by a rotation of the dihedral angle  $\beta$  (fig. 1), we determined the associated second barrier in dependence of  $F_{\text{ext}}$  again with the two-dimensional COGEF method and the control parameters  $d$  and  $\beta$ . More details about the method are given in our FIT report 2016.

The application of the method to both spiropyrans from fig. 1 yielded the total barriers of the colouration reaction in forward and backward direction in dependence of  $F_{\text{ext}}$ , depicted in fig. 2. For small  $F_{\text{ext}}$  the total barrier is defined by  $\beta$  rotation, while for larger  $F_{\text{ext}}$  it is defined by  $b$  breaking. In order to calculate the average rupture force  $F_{\text{rup}}$  at which colouration takes place, it is assumed that the external force  $F_{\text{ext}}$  is linearly increasing with time, hence  $F_{\text{ext}} = \alpha t$  with constant loading rate  $\alpha$ . Then, the transition rates can be calculated for each time point from the barriers and the forces can be averaged weighted by the transition probabilities (see also FIT report 2016).

The average forces  $F_{\text{rup}}$  for both spiropyrans calculated in this way are shown in fig. 3 in dependence of  $\alpha$ . The loading rate in the experiment was estimated to be smaller than 1nN/s

[3], that is the force needed to open SP/PmmpP is more than a factor of two larger as compared to  $\text{SP-NO}_2$ , see fig. 3. The reason for the larger rupture force in SP/PmmpP is the larger total barrier in forward direction up to  $F_{\text{ext}} \approx 0.7\text{nN}$  and the smaller total barrier in backward direction (see fig. 2). This explains why a more tear-resistant polymer structure is needed for the colouration of this kind of spiropyran [3]. Even for  $F_{\text{ext}} = 0$ , the total barrier in backward direction is much smaller for SP/PmmpP compared to  $\text{SP-NO}_2$ . This leads to the effect seen in experiment that the decoloration reaction without force is much faster for SP/PmmpP, see fig. 4. Therefore, theory explains the almost instantaneous visualization of the force using SP/PmmpP [3].

Fig. 1: Structural formulas of the calculated spiropyrans and the definitions of the distance  $d$ , the bond length  $b$  and the dihedral angle  $\beta$ . The force acts on the atoms which are indicated by the black points with arrows. A similar picture was already published [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

Fig. 2: Total barriers for the reaction from the colourless into the coloured spiropyran form in forward and backward direction in dependence of the external force  $F_{\text{ext}}$ . It is marked which of both transitions ( $b$  breaking/ $\beta$  rotation) has more influence on the reaction rate (energetically higher transition state), respectively. A similar picture was already published [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

Fig. 3: Average rupture force  $F_{\text{rup}}$  at which colouration takes place in dependence of loading rate  $\alpha$ . A similar picture was already published [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

Fig. 4: Probability of the coloured spiropyran form in dependence of time without external force starting from 100% coloured form. The half times are given in blue. A similar picture was already published [3]. © Functional Nanosystems Group, Freiburg.

## PROJEKTE / PROJECTS

SFB-TRR 141

„**SFB-Transregio 141: Biologisches Design und integrative Strukturen – Analyse, Simulation und Übertragung in die Architektur**“ – Jahr 3

T. Speck

Plant Biomechanics Group Freiburg (PBG), Botanischer Garten der Universität Freiburg und Freiburger Institut für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB-Transregio 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“

Im dritten Jahr des SFB-Transregio 141 (TRR 141) liefen acht der elf an der Universität Freiburg angesiedelten Projekte am Freiburger Zentrum für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT).

Ein Highlight im Jahr 2017 war die Eröffnung der Ausstellung „baubionik – biologie beflügelt architektur“ am 19. Oktober 2017 im Schloss Rosenstein des Staatlichen Museums für Naturkunde Stuttgart (SMNS) (Abb 1. & 2).



Abb. 1: Flyer zur Ausstellung des TRR 141 „baubionik – biologie beflügelt architektur“, im Schloss Rosenstein des Staatlichen Museums für Naturkunde Stuttgart. © PBG & SMNS

Die Ausstellung, die vom 19. Oktober 2017 bis zum 06. Mai 2018 geöffnet ist, gibt einen hervorragenden von den Wissenschaftlern/innen des TRR 141 und den Fachleuten des Naturkundemuseums in sehr gut verständlicher Weise aufgearbeiteten Überblick über im

Transregio laufenden Projekte. Sie deckt mit einer Vielzahl meist interaktiver Ausstellungsmodule sowohl die Bereiche der Grundlagenforschung mit ihren verschiedenen Herangehensweisen als auch durch meist mehrere Meter große Demonstratoren die hieraus hervorgegangenen bioinspirierten Anwendungen für Bauwesen und Architektur ab.



Abb. 2: Impressionen von der Ausstellung des TRR 141 „baubionik – biologie beflügelt architektur“, im Schloss Rosenstein des Staatlichen Museums für Naturkunde Stuttgart. © PBG & SMNS

Parallel zur Ausstellung wurde von den Mitarbeitern des TRR 141 das populärwissenschaftliche Buch „Baubionik – Biologie beflügelt Architektur“ verfasst, das in der Serie „Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C“ als Band 82 erschienen ist [1].



Abb. 3: Cover des populärwissenschaftlichen Buches "Baubionik – Biologie beflügelt Architektur", das die Ausstellung begleitet und in der Serie "Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde\_Serie C" als Band 82 veröffentlicht wurde (J. Knippers, U. Schmid and T. Speck, eds., 2017). © PBG & SMNS

Es kann einerseits als ein das Thema vertiefender Ausstellungsführer verwendet werden, stellt andererseits aber auch ein für sich allein stehendes Buch dar, das in 19 Kapiteln die Thematik Bionik und Architektur in allgemein verständlicher Weise aufarbeitet (Abb. 3). Nicht unerwähnt bleiben soll auch die Tatsache, dass sämtliche im Buch erschienenen Artikel vor ihrer Publikation von dem als Co-Editor fungierenden Leiter der Abteilung Bildung und Öffentlichkeitsarbeit des SMNS, Ulrich Schmid, auf Verständlichkeit überarbeitet und editiert wurden.

Basierend auf den im FIT angesiedelten TRR 141-Projekten sind in diesem Buch folgende Artikel erschienen, die einen guten Überblick über die jeweiligen Projektinhalte und den aktuellen Forschungsstand bieten:

- J. Knippers & T. Speck (2017): Editorial. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 4 – 5. Stuttgarter

Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

- J. Knippers & T. Speck (2017): Warum Bionik? – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 6 – 9. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- J. Knippers & T. Speck (2017): Alles beweglich. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 10 – 11. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- O. Speck, M. Caliaro, A. Mader & J. Knippers (2017): Pflanzen in Aktion. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 12 – 19. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- A. Westermeier, S. Poppinga, A. Körner, L. Born, R. Sachse, S. Saffarian, J. Knippers, M. Bischoff, G. Gresser & T. Speck (2017): Keine Gelenkbeschwerden – Wie Pflanzen sich bewegen und die Technik inspirieren. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 30 – 39. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- J. Knippers & T. Speck (2017): Leichte Allesköner – Struktur statt Masse. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 40 – 41. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- S. Schmier, G. Bauer, G. Buck, K. Klang, C. Lauer, N. Toader, O. Gericke, W. Haase, I. Schäfer, S. Schmauder, W. Sobek, K.G. Nickel & T. Speck (2017): Hohe Belastungen sicher überstehen. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 42 – 61. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- J. Knippers & T. Speck (2017): Eleganz und Leichtigkeit – bioinspirierte Kuppeln. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 80 – 81. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- Y. Malkowsky, A.K. Ostendorf, N. van Gessel, L. Nguyen, D. Lang, A. Menges, A. Roth-Nebelsick & R. Reski (2017): Evolutive Ansätze für explorative Entwurfsmethoden in der Architektur. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie beflügelt Architektur, 102 – 109. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

- J. Knippers & T. Speck (2017): Verzweigte Lastträger – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 110 – 111. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- Bunk, F.A. Jonas, L. Born, G.T. Gresser, J. Knippers, T. Speck & T. Masselter (2017): Vom Ast zum Palast. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 112 – 120. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- B. Özdemir, P. Asgharzadeh, A. Birkhold, O. Röhrle & R. Reski (2017): Das Plastidenskelett: ein Ideengeber im Nanobereich. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 121 – 124. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- O. Speck, J. Gantner, K. Sedlbauer & R. Horn (2017): Das bionische Versprechen. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 138 – 145. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.



Abb. 4: 6x6m großer Demonstrator der Flectofold Fassadenverschattung auf der TRR 141 Ausstellung im SMSN © PBG & SMSN

Weitere Highlights aus Freiburger Sicht waren verschiedene Auszeichnungen und Grants, die an Mitarbeiter/innen des SFB-TRR 141 verliehen wurden:

Mit dem *dritten Platz des AVK-Innovationspreises 2017 in der Kategorie „Forschung/Wissenschaft“* ausgezeichnet wurde ein Team unter Beteiligung von Prof. Dr. Thomas Speck, Dr. Simon Poppinga und

M.Sc. Anna Westermeier von der Plant Biomechanics Group am Botanischen Garten sowie vom Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien der Universität Freiburg. Die Forschergruppe wurden unter mehr als 70 Bewerbungen ausgewählt und für die Entwicklung der bionischen, gelenkfreien Fassadenverschattung „Flectofold“ nach dem Vorbild der fleischfressenden Wasserfalle (*Aldrovanda vesiculosa*) sowie der Streifenwanze (*Graphosoma italicum*) geehrt (Abb. 4).

Die Studie entstand im Rahmen des TRR 141 in Kooperation mit M.Sc. Larissa Born (ITFT Universität Stuttgart), Prof. Dr. Götz Gresser & Prof. Dr. Markus Milwich (Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf), Prof. Dr. Manfred Bischoff & M.Sc. Renate Sachse (IBB Universität Stuttgart), Prof. Dr. Jan Knippers, M.Sc. Axel Körner, M.Sc. Anja Mader, M.Sc. Saman Saffarian & Dipl.-Ing. Gundula Schieber (ITKE Universität Stuttgart) sowie Prof. Dr. Oliver Betz und M.Sc. Paavo Bergmann (Universität Tübingen) (Abb. 5).

Die AVK (Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. und AVK-TV GmbH) prämiert im Rahmen des „International Composites Congress“ in Stuttgart herausragende Innovationen im Bereich Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) / Composites. Besonderer Wert wird dabei auf das Thema Nachhaltigkeit gelegt.

Stefanie Schmier, Doktorandin im Projekt B01 des TRR 141, erhielt ein Stipendium im Rahmen des Intern Fellowship Programms des National Institute for Materials Science (NIMS) sowie ein Reisestipendium der Grünewald-Zuberbier-Stiftung und verbrachte im April und Mai 2017 einen zweimonatigen Forschungsaufenthalt in Japan am NIMS und an der Universität Tokio.

Außerdem erhielten noch drei weitere Freiburger Doktorandinnen des TRR 141 *Travel Grants*: Anna Westermeier (Projekt A04, Travel Grant of the Company of Biologists für die Teilnahme am SEB Annual Meeting 2017 in Göteborg, Schweden), Stefanie Schmier (Projekt B01, DAAD Reisestipendium zur Teilnahme am Gordon Research Seminar & Conference in South Hadley, USA) und Linnea

Hesse (Projekt A06, Trainee Stipend der International Society for Magnetic Resonance für die Teilnahme am 25. Annual Meeting der ISMRM in Honolulu, USA).



Abb. 5: Mit dem dritten Platz des AVK-Innovationspreises 2017 in der Kategorie „Forschung/Wissenschaft“ ausgezeichnetes TRR 141-Team. © PBG

Nach wie vor von großer Bedeutung für die interdisziplinäre Zusammenarbeit im TRR 141 sind neben den regelmäßigen Treffen in den einzelnen Projekten vor allem auch die im achtwöchigen Rhythmus stattfindenden TRR 141-Workshops und Doktorandenkolloquien. Sie finden im Wechsel an den am TRR 141 beteiligten Institutionen statt und werden reihum von den am TRR 141 beteiligten Arbeitsgruppen organisiert.

Im Jahr 2017 fanden vier TRR 141 Workshops und Doktorandenkolloquien zu verschiedenen Schwerpunktthemen in den teilnehmenden Institutionen statt.

- 10.02.2017 Universität Stuttgart / Fraunhofer IPA
- 24.03.2017 Universität Stuttgart
- 32.07.2017 Universität Freiburg
- 08.09.2017 Universität Tübingen

Der Freiburger TRR 141 Workshop 2017 wurde von den Doktoranden und Postdocs der Arbeitsgruppe von T. Speck organisiert. Als externer Referent konnte Dr. Nicholas P. Rowe von der UMR "Botanique et bioinformatique de l'architecture des plantes – AMAP Montpellier" in Frankreich gewonnen werden. In seinem Vortrag "Evolution, structural diversity and biomimetics" zeigte er auf, dass Ideen für die biomimetische Forschung auf vielfältige

Weise sowohl aus lebenden als auch fossilen Pflanzen generiert werden können.

Zusätzlich zu den im vorgestellten Buch des TRR 141 veröffentlichten Arbeiten wurden zahlreiche weitere Publikationen in Peer Reviewed Journals und Büchern sowie mehrere Conference Proceedings-Beiträge und weitere Kurzbeiträge (Miscellaneous) publiziert, die auf der Internetseite des TRR 141 zusammengestellt sind und aufgerufen werden können unter:

<http://www.trr141.de/index.php/publications/s>

Hier findet sich auch eine Liste der Interviews, die von Wissenschaftler/innen des TRR 141 im Jahr 2017 in verschiedenen Printmedien und elektronischen Medien sowie im Radio und Fernsehen gegeben wurden. Außerdem sind hier die Medienberichte über die im TRR 141 bearbeiteten Projekte und die wichtigsten Vorträge von Wissenschaftlern/innen des TRR 141 zusammengestellt.

Auf der Homepage des TRR 141 findet sich zudem eine ausführliche Darstellung der Struktur des SFB-TRR 141, der Inhalte der verschiedenen Projekte und der Portraits der beteiligten Forscher/innen.

Auch durch weitere Aktivitäten waren die Wissenschaftler/innen des TRR 141 im direkten Wissenstransfer aktiv. Für die seit 2011 an verschiedenen Orten gezeigten Bionik-Wanderausstellung mit den Titel „PatenteNatur NaturPatente – Was Bionik der Umwelt bringt“ des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg wurden – unter wissenschaftlicher Beratung von zwei Sprechern des TRR 141 (Thomas Speck & Jan Knippers) und der wissenschaftlichen Koordinatorin des FIT (Olga Speck) – zwei neue Exponate realisiert und in die Ausstellung integriert, die engen Bezug zu den im TRR 141 laufenden Forschungsprojekten haben. Eine der neuen Ausstellungswaben zeigt den Flectofin® eine bionische Fassadenverschattung, die von der Blüte der Paradiesvogelblume inspiriert ist. Die zweite Ausstellungswabe präsentiert einen Holzpavillon, dessen verzahnte Plattenbauweise von der Anordnung und Verbindung der Skelettplatten des Seeigelskeletts angeregt wurde. Die neuen

Exponate wurden der Landesgartenschau in Bad Herrenalb erstmals vorgestellt und der Öffentlichkeit im Rahmen einer Führung durch T. Speck und J. Knippers vorgestellt (Abb. 6).



Abb. 6: Führung durch die Ausstellung „Patente-Natur-Patente – Was Bionik der Umwelt bringt“ auf der Landesgartenschau in Bad Herrenalb. © PBG

[1] Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.) (2017) Baubionik - Biologie befähigt Architektur. – Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82. Stuttgart

## „SFB-Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – year 3

T. Speck

Plant Biomechanics Group Freiburg (PBG), Botanic Garden of the University of Freiburg and Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

Project funding: German Research Foundation (DFG) – Cooperative Research Center 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“

In the third year of the SFB Transregio 141 (TRR 141), eight of the eleven projects at the University of Freiburg were successfully carried out at the Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT).

In 2017, one highlight was the opening of the exhibition "baubionik - biologie befähigt architektur" im Schloss Rosenstein of the State Museum of Natural History in Stuttgart (SMNS) on 19 October 2017 (Figs. 1 & 2).

The exhibition will be open from 19 October 2017 to 6 May 2018. It provides an excellent overview of the projects studied in the TRR 141, which are presented in a very understandable way rehashed by the scientists of the TRR 141 and the experts of the Natural History Museum. With a large number of mostly interactive exhibition modules, it covers the areas of basic research with their various approaches as well as the resulting bioinspired applications for building construction and architecture by means of mostly several meters large demonstrators.

Parallel to the exhibition, the TRR 141 scientists wrote the popular scientific book "Baubionik - Biologie befähigt Architektur" ("Building biomimetics - Biology inspires architecture"), which was published as volume 82 in the series "Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C"[1].

On the one hand, it can be used as a guide to the theme of the exhibition, but on the other hand, it is also a book in its own right that deals with the topic of biomimetics and architecture in 19 chapters in a way that is generally understandable (Fig. 3). The fact that all articles published in the book were revised and co-edited by Ulrich Schmid, the head of the Department of Education and Public Relations of the SMNS, should not remain unmentioned.

Based on the TRR 141-projects in the FIT, the following articles have been published in this book which provide a good overview of the respective project contents and the current state of research:

- J. Knippers & T. Speck (2017): Editorial. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 4 – 5. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- J. Knippers & T. Speck (2017): Warum Bionik? – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 6 – 9. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

- J. Knippers & T. Speck (2017): Alles beweglich. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 10 – 11. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - O. Speck, M. Caliaro, A. Mader & J. Knippers (2017): Pflanzen in Aktion. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 12 – 19. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - A. Westermeier, S. Poppinga, A. Körner, L. Born, R. Sachse, S. Saffarian, J. Knippers, M. Bischoff, G. Gresser & T. Speck (2017): Keine Gelenkbeschwerden – Wie Pflanzen sich bewegen und die Technik inspirieren. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 30 – 39. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - J. Knippers & T. Speck (2017): Leichte Alleskönner – Struktur statt Masse. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 40 – 41. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - S. Schmier, G. Bauer, G. Buck, K. Klang, C. Lauer, N. Toader, O. Gericke, W. Haase, I. Schäfer, S. Schmauder, W. Sobek, K.G. Nickel & T. Speck (2017): Hohe Belastungen sicher überstehen. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 42 – 61. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - J. Knippers & T. Speck (2017): Eleganz und Leichtigkeit – bioinspirierte Kuppeln. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 80 – 81. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - Y. Malkowsky, A.K. Ostendorf, N. van Gessel, L. Nguyen, D. Lang, A. Menges, A. Roth-Nebelsick & R. Reski (2017): Evolutive Ansätze für explorative Entwurfsmethoden in der Architektur. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 102 – 109. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - J. Knippers & T. Speck (2017): Verzweigte Lastträger – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 110 – 111. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - Bunk, F.A. Jonas, L. Born, G.T. Gresser, J. Knippers, T. Speck & T. Masselter (2017): Vom Ast zum Palast. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 112 – 120. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - B. Özdemir, P. Asgharzadeh, A. Birkhold, O. Röhrle & R. Reski (2017): Das Plastidenskelett: ein Ideengeber im Nanobereich. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 121 – 124. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
  - O. Speck, J. Gantner, K. Sedlbauer & R. Horn (2017): Das bionische Versprechen. – In: J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.), Baubionik - Biologie befähigt Architektur, 138 – 145. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.
- Further highlights from the Freiburg perspective were various awards and grants awarded to employees of the TRR 141:
- The third place in the category "Research/Science" of the AVK Innovation Award 2017 went to a team of Prof. Dr. Thomas Speck, Dr. Simon Poppinga and M. Sc. Anna Westermeier from the Plant Biomechanics Group at the Botanic Garden and the Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies of the University of Freiburg. The researcher team was selected from more than 70 applications and honored for the development of the biomimetic, joint-free façade shading "Flectofold" based on the carnivorous water trap (*Aldrovanda vesiculosa*) and the striped bug (*Graphosoma italicum*) (Fig. 4).
- The study was carried out as part of the TRR 141 in cooperation with M. Sc. Larissa Born (ITFT University of Stuttgart), Prof. Dr. Götz Gresser & Prof. Dr. Markus Milwisch (Institute for Textile and Process Engineering (ITV) Denkendorf), Prof. Dr. Manfred Bischoff & M. Sc. Renate Sachse (IBB University of Stuttgart), Prof. Dr. Jan Knippers, M. Sc. Axel Körner, M. Sc. Anja Mader, M. Sc. Saman Saffarian & Dipl.-Ing. Gundula Schieber (ITKE University of Stuttgart) and Prof. Dr. Oliver Betz and M. Sc. Paavo Bergmann (University of Tübingen) (Fig. 5).
- The AVK (Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. and AVK-TV GmbH) awards outstanding innovations in the field of fiber-reinforced plastics (FRP) / composites within the

framework of the "International Composites Congress" in Stuttgart. Particular emphasis is placed on sustainability.

Stefanie Schmier, PhD student in project B01 of TRR 141, received a scholarship from the Intern Fellowship Programme of the National Institute for Materials Science (NIMS) and a travel grant from the Grünewald Zuberbier Foundation and spent two months in Japan at the NIMS and the University of Tokyo in April and May 2017.

In addition, three other Freiburg PhD-students from the TRR 141 were awarded travel grants: Anna Westermeier (project A04, Travel Grant of the Company of Biologists for participation in the SEB Annual Meeting 2017 in Gothenborg, Sweden), Stefanie Schmier (project B01, DAAD travel scholarship for participation in the Gordon Research Seminar & Conference in South Hadley, USA) and Linnea Hesse (project A06, Trainee Stipend of the International Society for Magnetic Resonance for participation in the 25th International Society for Magnetic Resonance Annual Meeting of ISMRM in Honolulu, USA).

Still essential for the interdisciplinary cooperation are – in addition to regular meetings of the partners in the specific projects – especially the eight-weekly "TRR 141 Workshops and PhD-researcher colloquia". They rotate between the institutional partners of the TRR 141, and are organized by the respective working groups being members of the TRR 141.

In 2017, four "TRR 141 Workshops and PhD-researcher colloquia" took place dealing with different focal topics.

- 10.02.2017 University of Stuttgart / Fraunhofer IPA
- 24.03.2017 University of Stuttgart
- 32.07.2017 University of Freiburg
- 08.09.2017 University of Tübingen

The Freiburg TRR 141 Workshop 2017 and the doctoral colloquia were organized by the PhD students and postdocs of T. Speck's working group. Dr. Nicholas P. Rowe from the UMR "Botanique et bioinformatique de l' architecture des plantes - AMAP Montpellier" in France was invited as an external speaker. In

his lecture entitled "Evolution, structural diversity and biomimetics" he showed that ideas for biomimetic research can be generated from living and fossil plants in many different ways.

In addition to the work published in the presented book of the TRR 141, numerous publications in peer reviewed journals and books as well as several contributions to conference proceedings volumes and further short communication (miscellaneous) were published. They are compiled on the webpage of the TRR 141 and can be found under:

<http://www.trr141.de/index.php/publications/s>

Here also a list of interviews can be found given by scientists of the TRR 141 in 2017 for various print-media and electronic media as well as on air or in TV. Additionally, media coverage on projects of the TRR 141 and the most important oral presentations given by TRR 141 scientists are complied.

Here also a detailed description of the structure of TRR 141, the topics of the various projects and the portraits of the scientists involved is given.

The scientists of TRR 141 were also actively involved in the direct transfer of knowledge through other activities. Two new exhibition moduls have been realized for the travelling biomimetics exhibition "PatenteNatur–NaturPatente – Was Bionik der Umwelt bringt" of the Ministry for the Environment, Climate and Energy of the State of Baden-Württemberg, which has been shown in various locations since 2011. Two of the speakers of TRR 141 (Thomas Speck & Jan Knippers) and the scientific coordinator of FIT (Olga Speck) have been given scientific advice. One of the new exhibition honeycombs shows the Flectofin® a biomimetic façade shading system inspired by the flowers of the bird of paradise. The second exhibition honeycomb presents a wooden pavilion whose interlocked panel construction was inspired by the arrangement and connection of the skeleton plates of the sea urchin skeleton. The new exhibits were presented for the first time at the Landesgartenschau in Bad Herrenalb and presented to the public during a guided tour by T. Speck and J. Knippers (Fig. 6).

Fig. 1: Flyer for the exhibition of the TRR 141 "baubionik - biologie beflügelt architektur", im Schloss Rosenstein of the State Museum of Natural History in Stuttgart. © PBG & SMNS

Fig. 2: Impressions from the exhibition of the TRR 141 "baubionik - biologie beflügelt architektur", at Schloss Rosenstein of the State Museum of Natural History in Stuttgart. © PBG & SMNS

Fig. 3: Cover of the popular-scientific book "Baubionik - Biologie beflügelt Architektur", which accompanied the exhibition and was published as volume 82 in the series "Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde Serie C" (J. Knippers, U. Schmid and T. Speck, eds., 2017). PBG & SMNS

Fig. 4: 6x6m large demonstrator of the Flectofold facade shading system at the TRR 141 exhibition in the SMSN © PBG & SMNS

Fig. 5: TRR 141 team awarded the third place in the category "Research/Science" of the AVK Innovation Award 2017. © PBG

Fig. 6: Guided tour through the exhibition „PateNatur–NaturPatente – Was Bionik der Umwelt bringt“ presented at the Landesgartenschau in Bad Herrenalb. © PBG

## ERC GRANT „TIMEPROSAMAT“

### Time-Programmed Self-Assemblies and Dynamic Materials

Andreas Walther

A<sup>3</sup>BMS Lab, Institut für Makromolekulare Chemie, Stefan Meier Straße 31, 79104 Freiburg, Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Vom Leben inspirierte Systeme außerhalb des Gleichgewichtes werden die Grundlage für die nächste Generation molekularer Materialien mit aktiven, adaptiven, autonomen Eigenschaften mit emergenten und intelligentem Verhalten schaffen. In der Tat bietet das Leben die besten Demonstrationen von komplexen und funktionellen Systemen außerhalb des Gleichgewichts: Zellen verfolgen die Zeit, kommunizieren, bewegen sich, passen sich an, entwickeln und reproduzieren sich kontinuierlich. Gestützt auf das Verständnis biologischer Prinzipien entstehen in vielen Bereichen der Wissenschaft der weichen Materie künstliche Nichtgleichgewichtssysteme.

TimeProSAMAT zielt darauf ab, Konzepte zu entwickeln, um die Zeitdomäne von sich selbst assemblierenden Systemen und Materialien in geschlossenen/autonomen Systemen unter Nichtgleichgewichtsbedingungen zu programmieren. Programmierbare Lebensdauern sind ein Ziel. Basis hierfür ist die Kontrolle über die Kinetik von Auf- und Abbau-Reaktionen mittels Energiedissipationsschemata und Rückkopplungsmechanismen. Nach einem Erreichen eines grundlegenden Verständnisses auf der Selbstassemblierungsskala für biomakromolekulare Komponenten wollen wir diese entscheidenden Konzepte für grundlegend neue und originelle Ansätze in autonom dynamischen weichen Materialien mit intrinsisch kodierten Selbstregulationsmechanismen nutzen. Dies wird den Weg bereiten zu aktiven Funktionalitäten und adaptiven Eigenschaften, die über das hinausgehen, was klassische Gleichgewichtssysteme und Materialien derzeit bieten können.

Lesen Sie mehr unter:

"Materials learning from life: concepts for active, adaptive and autonomous molecular systems" Chem. Soc. Rev. 2017, 46, 5588.

"Approaches to program the time domain of self-assemblies" Soft Matter, 2015, 11, 7857.

### Time-Programmed Self-Assemblies and Dynamic Materials

Andreas Walther

A<sup>3</sup>BMS Lab, Institute for Macromolecular Chemistry, Stefan Meier Straße 31, 79104 Freiburg, Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired technologies

Life-inspired out-of-equilibrium systems will set the scene for the next generation of molecular materials with active, adaptive, autonomous, emergent and intelligent behavior. Indeed life provides the best demonstrations of complex and functional out-of-equilibrium systems: cells keep track of time, communicate, move, adapt, evolve and replicate continuously. Stirred by the understanding of biological principles, artificial out-of-equilibrium systems are emerging in many fields of soft matter science.

TimeProSAMAT aims to introduce concepts to program the time domain of self-assembled systems and materials in closed systems under non-equilibrium conditions by controlling the kinetics of assembly and disassembly pathways via energy dissipation schemes and feedback mechanisms. Programmable lifetimes are one major goal. After reaching a fundamental understanding on a self-assembly level for biomacromolecular components, we want to capitalize on these enabling concepts by providing entirely new and original approaches to dynamic soft materials with internally encoded self-regulation features (similar to a self-destruction mechanism), opening doors to active functionalities and adaptive properties beyond what classical responsive equilibrium self-assemblies and materials can offer.

## IRTG 1642

### **Internationales Graduiertenkolleg / International Research Training Group (IRTG) "Soft Matter Sci- ence: Concepts for the Design of Functional Materials"**

G. Reiter, J. Baschnagel, J. Husse, B. Zovko,  
A. Joers, A. Link

zwischen den Universitäten Freiburg und Strasbourg mit der Beteiligung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Basel und Mulhouse



Abb. 1: IRTG SoMaS Logo. Foto: IRTG SoMaS

Der Bereich der „Weichen Kondensierten Materie“ (= Soft Matter) stellt ohne Zweifel eine wachsende und interdisziplinäre Richtung in Forschung und Lehre dar, die Chemiker, Physiker und Ingenieure gleichermaßen fasziniert. Zum Teil beruht dieses Interesse auf den er-

staunlichen Eigenschaften von „weichen Materialien“, z. B. deren einzigartiger Fähigkeit auf äußere Reize durch entsprechende Anpassung zu reagieren. Auch schwache Stimuli von außen können erhebliche Veränderungen im Verhalten dieser Materialien und deren Strukturierung auf mesoskopischen Skalen hervorrufen. Während die „Weichheit“ und damit die Veränderbarkeit dieser Materialien das Ergebnis von relativ schwachen Wechselwirkungen zwischen den Bausteinen ist, erfolgt die Strukturierung auf verschiedenen Längenskalen oft als Konsequenz von Selbstorganisationsprozessen, das heißt der spontanen Bildung von geordneten Bereichen, die oft sehr viel größer sind als die einzelnen Moleküle. Die moderne Materialforschung nutzt diese Merkmale zunehmend zur Herstellung von innovativen und funktionellen Materialien. Oft bestehen solche Systeme aus mehreren komplementären Komponenten, die über die verschiedenen Grenzflächen und den damit verbundenen effektiven, aber auch komplexen Wechselwirkungen große Flexibilität und Anpassungsfähigkeit ermöglichen. Es ist eine große wissenschaftliche Herausforderung, ein tiefgehendes Verständnis für das Zusammenspiel dieser Wechselwirkungen und den Synergien zwischen stimulierenden bzw. steuernden Faktoren zu erzielen, damit deren Auswirkungen auf die Materialeigenschaften vorhersagbar und kontrollierbar werden. Fortschritte in dieser Richtung sind somit äußerst dienlich und meistens unverzichtbar, um neue Materialien mit einem hohen Maß an Funktionalität und mit außergewöhnlichen Eigenschaften herzustellen, die den von der Natur verwendeten Materialien zumindest nahekommen.

Das Ziel des Internationalen Graduiertenkollegs „Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials“ ist es, ein attraktives internationales Forschungsangebot für talentierte und motivierte Studierende zu gewährleisten. Der wissenschaftliche Austausch zwischen den Universitäten von Freiburg und Strasbourg, aber auch die Mitarbeit einiger Kolleginnen und Kollegen aus Basel und Mulhouse, im Bereich moderner Forschung an „weicher Materie“, stellen ein weiteres wesentliches Ziel dar.

Der erste Förderzeitraum des IRTG Soft Matter Science begann im Oktober 2010 und endete im März 2015. Im April 2015 startete das IRTG Soft Matter Science in die zweite Phase der Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die bis September 2019 läuft und aus drei eng miteinander verbundenen Themenbereichen mit aktuell 20 wissenschaftlichen Teilprojekten besteht, die jeweils eine oder zwei sich ergänzende Doktorarbeiten beinhalten und ein breites Spektrum verschiedenster Aspekte von „Soft Matter Science“ abdecken. Alle Promotionsprojekte sind bilateral, unter deutscher und französischer Betreuung. Langzeitaufenthalte in den Laboren der Projektpartner, kombiniert mit mehreren kurzzeitigen Besuchen, die sich durch die räumliche Nähe der beteiligten Universitäten leicht durchführen lassen, sind ein integraler Bestandteil dieses Graduiertenprogramms. Die Ausbildung über Forschungsprojekte wurde seit Beginn des Graduiertenkollegs durch eine Vielzahl von Zusatzaktivitäten begleitet. Im Jahr 2017 waren dies:

- Zwei wissenschaftliche Workshops zum Thema „Soft Matter Science“ im Juni und November 2017
- Eine Sommerschule mit dem Titel „Organic Electronics: Correlation between Structure and Electronic Properties“ mit drei Vortragseinheiten, Forschungs- und Vertiefungsseminaren, Postersitzungen der Studierenden sowie Seminaren zur Karriereplanung
- Wöchentlich stattfindende Seminare, die von nationalen und internationalen Experten/-innen aus dem Bereich „weiche Materie“ gehalten werden



Abb. 2: SoMas Summer School 2017 in Mittelwihr.  
Foto: Jana Husse

Das Forschungsprogramm des zweiten Förderzeitraums wurde aufgrund der gewonnenen Erfahrung während des ersten Förderzeitraums entwickelt. Es folgt der gleichen interdisziplinären Strategie wie zuvor, besteht jedoch aus enger miteinander verbundenen Promotionsprojekten, um Kollaborationen zu erweitern. Obwohl das Programm hauptsächlich auf Grundlagenforschung („Konzepte“) ausgerichtet ist, liegt ein Schwerpunkt darin, die Entwicklung funktionaler Materialien für zukünftige Anwendungen voranzutreiben. Damit diese zentrale Forschungsidee verwirklicht werden kann, baut das Forschungsprogramm auf den drei folgenden Themenbereichen auf:

- A. Soft Matter Interfaces: From Membranes to Tribology
- B. From Design to Multifunctional Materials and Devices
- C. From Physical Concepts to Material Properties

Diese Themenbereiche bilden die Säulen eines kohärenten Forschungsprogramms aus folgenden Gründen: Die Erforschung neuartiger funktionaler Materialien, die auf Systemen weicher Materie basieren, beinhaltet ein Verständnis von (Selbst-)Organisationsprozessen sowie dem Einfluss von Oberflächen. Typischerweise bestehen die untersuchten Materialien aus speziell angefertigten Molekülen mit häufig multifunktionalen Eigenschaften, die so gestaltet sind, dass sie sich in hierarchischen Strukturen zusammenfügen. Die Eigenschaften vieler Systeme weicher Materie werden nicht nur durch das thermische Gleichgewicht bestimmt, sondern hängen oft von ihrer Vorbereitung oder ihrer Verarbeitungshistorie ab. Folglich existieren physikalische Prozesse, die es erlauben, Eigenschaften zu verändern, indem Organisationsprozesse gesteuert werden. Zum Beispiel über die Kontrolle von Grenzflächen-Strukturen oder Zusammensetzungen.

Die wissenschaftlichen Fragestellungen der drei Themenbereiche sind daher eng miteinander verknüpft und haben vielfache methodische Überschneidungen. Der Erfolg des IRTG „Soft Matter Science“ beruht auf einem

verbundenen und interdisziplinären Forschungsprogramm, das einander ergänzendes Wissen aus Physik, Chemie, Material- und Ingenieurwissenschaften sowie Biologie erfordert und zusammenbringt. Auf diese Weise trägt das IRTG „Soft Matter Science“ dazu bei, Konzepte für die Herstellung neuartiger weicher Materialien zu entwickeln.

### **International Research Training Group (IRTG) “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials”**

G. Reiter, J. Baschnagel, J. Husse, B. Zovko,  
A. Joers, A. Link

between the universities of Freiburg and Strasbourg with the participation of scientists from Basel and Mulhouse

Attracting equal attention from chemists, physicists, biologists, and engineers, soft matter science is without any doubt a growing and interdisciplinary field of research. In part, this appeal comes from the astounding properties of “soft materials”, e.g., from their unique capacity to respond to external stimuli. Even weak stimuli may induce significant changes in behaviour due to the “softness” and mesoscopic structuring of the material. While the softness results from weak interactions – comparable in strength to the thermal energy – between the constituents, mesoscopic structuring is often a consequence of self-assembly, i.e., of the spontaneous organization of matter into ordered arrangements much larger in size than the constituent molecules. Modern materials science increasingly exploits these distinctive features for the design of new materials. Many of today's interesting systems have multiple components, various interfaces, and complex effective interactions. Understanding the synergy of these factors and their impact on materials properties presents a great scientific challenge. Advances in this respect hold the promise of creating novel materials with a level of functionality similar to that existing in nature.

The International Research Training Group (IRTG) “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials” is a research training programme between the universities of Freiburg and Strasbourg with the participation of scientists from Basel and Mulhouse. The objective of the IRTG “Soft Matter Science” is to promote graduate education and scientific exchange in this modern field of research on soft matter materials.

The first funding period of the IRTG Soft Matter Science started in October 2010 and ended in March 2015. The research programme of the second funding period (April 2015 to September 2019) consists of three interconnected themes with currently 20 PhD projects in total, representing a large spectrum of diverse aspects of soft matter science. All PhD projects are bilateral, having a German and a French supervisor. Stays at the partner laboratories, facilitated by the geographic proximity of the involved sites, are an integral part of the PhD training programme. Training through research is complemented by a qualification programme consisting of internal workshops, summer schools, and seminars given by experts from outside the IRTG. In 2017, the IRTG successfully organized its 7<sup>th</sup> SoMas Summer School with the topic “Organic Electronics: Correlation between Structure and Electronic Properties”, which took place from July 2-7, 2017 in Mittelwihr, Alsace. Amongst other events, the IRTG also organized a Winter Workshop and a Training Camp which took place from November 30<sup>th</sup> –December 1<sup>st</sup> in Offenburg.

**The research programme** of the second funding period has been designed by drawing on the experience gained during the first funding period. It follows the same interdisciplinary strategy as before, but consists of PhD projects that are more strongly interlinked to enhance collaborations. Even though the programme is mainly engaged in basic research (“Concepts”), it has a clear focus to contribute to the development of functional materials for future applications. In order to realize this core research idea, the research programme is structured around three thematic areas:

- A. Soft Matter Interfaces: From Membranes to Tribology
- B. From Design to Multifunctional Materials and Devices
- C. From Physical Concepts to Material Properties

These thematic areas constitute the pillars of a coherent research programme due to the following reasons: The investigation of advanced functional materials based on soft matter systems involves an understanding of (self-) assembly processes and of the impact of interfaces. Typically, the studied materials consist of specifically designed molecules, often with multiple functional features and programmed to assemble into hierarchical structures. The properties of many soft matter systems are not only dictated by thermal equilibrium, but often depend on preparation or processing history. Thus, physical pathways exist which allow to tune properties by directing assembly processes, for example, via the control of interfacial structures or formulations.

The scientific questions of all three thematic areas are thus closely linked and have multiple methodological overlap. Success of the IRTG Soft Matter Science rests upon an interconnected and interdisciplinary research programme which requires and brings together complementary knowledge from physics, chemistry, materials science, engineering, and biology. In this way, the IRTG Soft Matter Science contributes to developing concepts for the design of advanced soft matter materials.

Fig. 1: IRTG SoMas Logo. Foto: IRTG SoMaS

Fig. 2: SoMas Summer School 2017 in Mittelwihr.  
Foto: Jana Husse

## ERC STARTING GRANT "REGENERATE"

### **Häuten oder nicht häuten, das ist hier die Frage.**

Esther K. Riga<sup>1</sup> and Karen Lienkamp<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bioactive Polymer Synthesis and Surface Engineering Group, Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) und Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektfinanzierung: European Research Council (ERC) Starting Grant, Projektakronym: REGENERATE

Das Projektziel von REGENERATE ist, funktionelle Systeme zu untersuchen, die aus mehreren Polymerlagen bestehen und sich regenerieren können.[1] Sobald diese Materialien ihre ursprüngliche Funktion verlieren, z.B. durch Beschädigung oder Kontamination, sollen sie durch das Abschälen ("Sich Häuten") einer äußeren Schicht diese Funktion wiederherstellen können. Ein Beispiel für eine solche regenerierbare Aktivität ist eine antimikrobielle Wirksamkeit, ein anderes eine elektrochemische Aktivität. Das Zielsystem des Projekts besteht aus mehreren Lagen aus funktionellen und abbaubaren Polymeren, die alternierend aufeinander gestapelt sind (Abbildung 1).

Die Frage, wie man solche Polymermehrschichtsysteme auseinandernehmen kann, ist bisher wissenschaftlich nicht gelöst. Im Zusammenhang mit Drug Delivery-Systemen wurde bereits versucht, mittels der Layer-by-layer-Technik hergestellte Multilagensystem kontrolliert zu "häuten".[2] Da diese Polymerarchitekturen aber nicht aus diskreten Schichten ("Pfannkuchenstapel"), sondern aus stark wechselwirkenden, miteinander verschlungenen Schichten ("Rührei") bestehen, war dies nicht möglich.

Wenn man aus definierten Einzelschichten bestehende Multilagensystem auseinander nehmen möchte, stellt sich die Frage, wie man die adhäsiven Wechselwirkungen zwischen den Schichten bricht. In unserem Mehrschichtsystem wird dies erreicht, indem eine zwei funktionelle Lagen trennende Zwischenschicht hydrolytisch degradiert wird. In einer Machbarkeitsstudie wurde gezeigt, dass man

ein Drei-Lagen-System aus zwei antimikrobiellen Polymerschichten und einer abbaubaren Polymerzwischenschicht so einmal "häutet" kann, wobei die Funktion der neuen antimikrobiellen Schicht erhalten bleibt.[3]

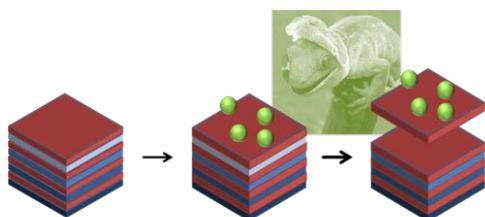


Abb. 1: Das Zielmaterial des Projekts ist ein Polymermehrschichtsystem aus alternierenden abbaubaren (blau) und funktionellen Lagen (rot). Wie ein Reptil, das sich häutet, soll das Material in der Lage sein, seine Funktion durch Abschälen der obersten Schicht zu erneuern, indem sich die darunter liegende abbaubare Schicht zerstört. Dadurch werden Kontaminationen entfernt und die darunterliegende funktionelle Lage freigelegt. (© Karen Lienkamp)

Neuere Daten geben Hinweise darauf, dass das Ablösen solcher Schichten keine rein thermodynamische Problem ist, sondern auch eine ausgeprägte kinetische Komponente hat. Unter Bedingungen, bei denen die degradierbare Schicht schnell hydrolysierte, konnte eine antimikrobielle Polymerschicht abgeschält werden. Dieser Vorgang fand aber nicht statt, wenn der Degradationsprozess langsam war.[4] Wir gehen davon aus, dass dies daher röhrt, dass ein großer Anteil der adhäsiven Wechselwirkungen zwischen den Schichten gleichzeitig gelöst werden muss, um eine "Häutung" zu erreichen. Im kommenden Jahr soll dieser Aspekt, und damit die Frage des Häutens oder Nicht-Häutens, im Detail untersucht werden.

[1] Dorner, F.; Riga, E. K. ; Lienkamp, K. FIT Jahresbericht 2015; Riga, E. K. ; Lienkamp, K. FIT Jahresbericht 2016.

[2] Lynn, D. M. Peeling back the layers: Controlled erosion and triggered disassembly of multilayered polyelectrolyte thin films. *Advanced Materials* 2007, 19 (23), 4118-4130.

[3] Dorner, F.; Boschert, D.; Schneider, A.; Hartleb, W.; Al-Ahmad, A.; Lienkamp, K. Toward Self-regenerating Antimicrobial Polymer Surfaces. *ACS Macro Lett.* 2015, 4, 1337-1340.

[4] Riga, E. K. Dissertation, in Vorbereitung.

## To Shed, or Not to Shed – That Is the Question.

Esther K. Riga<sup>1</sup> and Karen Lienkamp<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bioactive Polymer Synthesis and Surface Engineering Group, Department of Microsystems Engineering (IMTEK) and Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

Project funding: European Research Council (ERC) Starting Grant, Project Acronym: REGENERATE

As reported in previous FIT-Reports,[1] the aim of the REGENERATE project is to investigate systems consisting of functional and degradable polymer layers that are alternately assembled into a polymer layer multi-stack (Figure 1). If such a material is able to shed its top layer when its function is compromised, for example by damage or contamination, it could regenerate the original activity. Antimicrobial activity is one example of an activity that could thus be regenerated; another one is the activity of an electrochemical sensor.

The problem how to disassemble a polymer layer multi-stack is an open scientific question. It has been previously addressed in the context of drug delivery using materials obtained by the layer-by-layer (LbL) technique.[2] These, however, form intermingled polymer layers. Instead of a "pancake stack" architecture (the target of our project), LbL architectures rather have a resemblance to "scrambled eggs" and thus cannot be shed one layer at a time.

When trying to disassemble a polymer multi-stack made from discrete layers, one has to consider how to break the adhesive forces between these layers. In our multi-stack design, we chose to degrade an interlayer between two functional layers to achieve this. In a proof-of-concept study, we demonstrated that it was possible to shed the top layer from a three layer system by degrading the middle layer. Thus, the surface of the bottom layer was revealed, which had retained its antimicrobial activity.[3]

However, recent data obtained in this project shows that shedding is not a mere thermodynamic issue. It also has a profound kinetic component. For example, an antimicrobial

layer that could be easily shed under fast degradation conditions could not be removed when the degradation rate was slower.[4] Our current hypothesis is that this relates to the number of adhesive interactions between two layers that need to be broken simultaneously in order to achieve layer shedding. Analyzing this aspect in more detail, and thus to determine by design whether the stack will shed or not shed, will be the aim of the coming year.

Fig. 1: Project concept. The target material is a polymer layer multi-stack consisting of alternating degradable and functional (e.g. antimicrobial) layers. Like a reptile shedding its skin, the top antimicrobial layer (red) can be removed when it is contaminated. This is possible by degradation of the polymer layer underneath (light blue). The shedding event removes the contamination and reveals a fresh functional polymer layer underneath. (© Karen Lienkamp)

## “ANTIBUG”

### **Simultan antimikrobielle, protein-abweisende und zellkompatible Polymere als Beschichtungen für Medizinprodukte**

Monika Kurowska, Alice Eickenscheidt, und Karen Lienkamp<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bioactive Polymer Synthesis and Surface Engineering Group, Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) und Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektfinanzierung: VIP+-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Projektakronym: ANTIBUG.

Bakterielle Biofilme auf Medizinprodukten verursachen Infektionen, die tödlich enden können, besonders wenn Sie von resistenten Keimen verursacht wurden. Neben dem Leiden der Patienten entsteht dabei auch dem Gesundheitssystem ein erheblicher wirtschaftlicher Schaden. Daher sind Beschichtungen, die die Ausbreitung von resistenten Keimen erfolgreich unterdrücken können, eine drin-

gend benötigte Innovation. Wir haben eine Polymerbeschichtung (PZI) entwickelt, die im Gegensatz zum Stand der Technik nicht nur antimikrobiell wirkt, sondern gleichzeitig protein-abweisend ist (Abbildung 1). In in-vitro-Experimenten wurde gezeigt, dass die PZI-Oberfläche sowohl Gram-negative *Escherichia coli*-Bakterien als auch Gram-positive *Staphylococcus aureus*-Bakterien in mindestens gleichem Umfang wie eine antimikrobielle Referenz-Substanz (SMAMP) abtötet (Abbildung 1A und B). Auf der antimikrobiellen Oberfläche adhärieren aber Proteine sehr stark (Abbildung 1C). Dies ist problematisch, da Proteinadhäsion der erste Schritt bei der Bildung eines bakteriellen Biofilms ist und beschränkt daher das Anwendungsgebiet solcher antimikrobiellen Polymere. Auf der PZI-Oberfläche dagegen bleibt die Proteinadhäsion gering und reversible (Abbildung 1C). Das besondere an der PZI-Beschichtung ist, dass sie nur aus einer aktiven Komponente besteht und keine antimikrobiellen Wirkstoffe freisetzt. Zudem lässt sie sich in einem einfachen Verfahren auf verschiedene für die Medizintechnik relevante Oberflächen, v.a. Kunststoffe und Metalle, aufbringen. Es wurde bereits gezeigt, dass PZIs in vitro die Bildung von bakteriellen Biofilmen effizient unterdrücken.[1] Mit solchen Beschichtungen könnten daher die Infektions- und Mortalitätsraten bei bakteriellen Infektionen im Zusammenhang Medizinprodukten erheblich gesenkt werden. Ziel dieses Projekts ist daher, derartige Beschichtungen für die Anwendungen Blasenkatheter und Wundverband zu validieren. Dazu soll deren Sterilisierbarkeit, Lagerstabilität und Stabilität unter Anwendungsbedingungen getestet werden. Die Ergebnisse sollen zeigen, ob diese Beschichtungen prinzipiell auch in vivo eingesetzt werden könnten.

[1] Kurowska, M.; Eickenscheidt, A.; Guevara-Solarte, D. L.; Widyaya, V. T.; Marx, F.; Al-Ahmad, A.; Lienkamp, K. A Simultaneously Antimicrobial, Protein-repellent and Cell-compatible Polyzwitterion Network. Biomacromolecules 2017, 18 (4), 1373-1386.

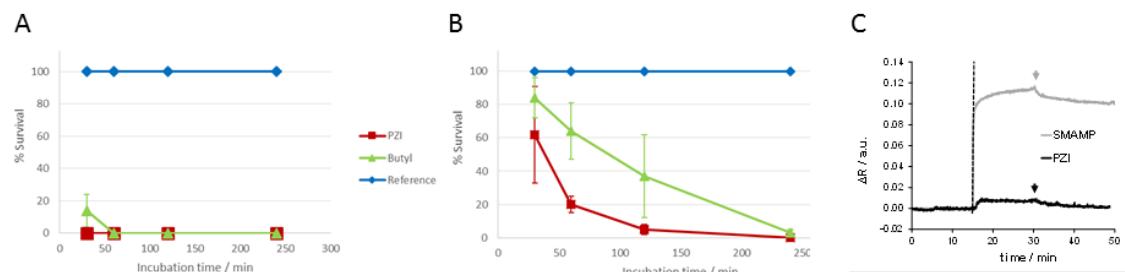


Abb. 1: Zeitabhängige Abtötung von *E. coli* (A) bzw. *S. aureus* (B) durch die PZI-Beschichtung (rot) (grün - Butyl-SMAMP; blau – Negativkontrolle). Das Überleben der Bakterien ist gegen die Verweilzeit auf der Oberfläche aufgetragen. PZI tötet mehr Bakterien schneller ab als das Butyl-SMAMP. C: Untersuchung der Proteinadsorption auf PZI und SMAMP durch Oberflächenplasmonenresonanz-Spektroskopie (SPR, relative Adsorption gegen Zeit). Nach dem Einspritzen von Proteinelösung (Fibrinogen, gestrichelte Linie bei ca. 15 min) adsorbiert das SMAMP-Netzwerk (grau) viel Protein, welches sich nicht durch Spülen (grauer Pfeil) entfernen lässt. Dagegen liegt die Proteinadsorption für das PZI (schwarz) nach Spülen an der Nachweisgrenze der Methode (Schichtdickenbestimmung mittels SPR: SMAMP - 6.6 ng cm<sup>-2</sup> Fibrinogen; PZI - 0 ng cm<sup>-2</sup>). © Karen Lienkamp

## Towards Medical Products With Simultaneous Antimicrobial Activity, Protein-repellency and Cell-compatibility

Monika Kurowska, Alice Eickenscheidt, and Karen Lienkamp<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bioactive Polymer Synthesis and Surface Engineering Group, Department of Microsystems Engineering (IMTEK) and Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

Project funding: VIP+ Program of the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), Project acronym: ANTIBUG.

Bacterial biofilms on medical devices can cause severe infections. If resistant bacteria are involved, these infections may even become deadly. In addition to the human suffering involved, biofilm formation causes additional costs in the healthcare sector. Thus, materials that can reduce biofilm formation and the spreading of resistant bacteria are a direly needed innovation.

We have recently developed a polymer coating (PZI) that is not only antimicrobially active - like many others that were previously reported - but at the same time protein-repellent (Figure 1). It mimics the polyzwitterionic cell envelope of eukaryotic cells, yet unlike other polyzwitterions contains functional groups that make it antimicrobial. The PZI coating has been shown to kill both Gram-negative

*Escherichia coli* bacteria and Gram-positive *Staphylococcus aureus* bacteria at least as efficiently as an antimicrobial reference substance (SMAMP, Figure 1A and B). It was also shown that proteins strongly adhere to the antimicrobial SMAMP, while protein adhesion was low and reversible on the PZI surface (Figure 1C).

This is particularly relevant for practical applications in the medical field, because protein adhesion is the first step of the biofilm formation process. Thus, the range of applications for purely antimicrobial polymers is limited, while a multifunctional material like the PZI could be a promising candidate for many medical applications. Another special feature of the PZI coating is that it consists of only one active component, and that it does not leach antimicrobials. Additionally, it can be surface-attached to many medically relevant materials (polymers, metals) in a simple process. We have already demonstrated that PZI coatings significantly reduce the formation of bacterial biofilms in vitro.[1]

Thus, the aim of this project is to validate the PZI coating for medical applications like urinary catheters and wound dressings. Additionally, we plan to test its sterilizability, storage stability and stability under conditions of use. These properties are prerequisites for any medical applications.

Fig. 1: Time-dependent killing of E. coli (A) and S. aureus (B) by PZI coatings (red) in comparison to antimicrobial SMAMP coatings (green) and the negative control (blue). Bacterial survival (in %) is plotted vs. contact time with the surfaces. PZI kills bacteria faster and more efficiently than SMAMP. C: Protein adhesion studies on PZI and SMAMP surfaces using surface plasmon resonance spectroscopy (SPR, change in reflectivity is plotted vs. time). After injection of the protein solution (fibrinogen, dashed line around 15 min), the SMAMP

network (grey) adsorbs a substantial amount of protein, which cannot be removed by washing (grey arrow). Protein adhesion on the PZI (black) is overall low and below the detection limit of the method after washing with buffer (black arrow). Layer thickness before and after protein adhesion determined by SPR: SMAMP - 6.6 ng cm<sup>-2</sup> Fibrinogen; PZI - 0.0 ng cm<sup>-2</sup>. (c) Karen Lienkamp

## PUBLIKATIONEN / PUBLICATIONS

### PEER-REVIEWED PUBLICATIONS

Born L, Körner A, Schieber G, Westermeier AS, Poppinga S, Sachse R, Bergmann P, Betz O, Bischoff M, Speck T, Knippers J, Milwich M, Gresser GT (2017): Fiber-reinforced plastics with locally adapted stiffness for bio-inspired hingeless, deployable architectural systems. *Key Engineering Materials* **742**, 689–696, Trans. Tech. Publications, Switzerland. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.742.689

Brügner O, Reichenbach T, Sommer M, Walter M (2017): Substituent Correlations Characterized by Hammett Constants in the Spiropyran–Merocyanine Transition. *J. Phys. Chem. A* **121**, 2683–2687. DOI: 10.1021/acs.jpca.7b01248

Bunk K, Fink S, Speck T, Masselter T (2017): Branching morphology, vascular bundle arrangement and ontogenetic development in the leaf insertion zones and ramifications of three arborescent Araliaceae species. *Trees – Structure and Function* **31**, 1793–1809. DOI: 10.1007/s00468-017-1585-8

Chandran S, Handa R, Kchaou M, Al Akhrass S, Semenov A, Reiter G (2017): Time Allowed for Equilibration Quantifies the Preparation Induced Non-equilibrium Behavior of Polymer Films. *ACS Macro Lett.* **6**, 1296–1300.

Deng Z, Hoefling A, Théato P, Lienkamp K (2017): Surface Properties and Antimicrobial Activity of Poly(sulfur-co-1,3-diisopropenylbenzene) Copolymers. *Macromol. Chem. Phys.* 1700497. DOI: 10.1002/macp.201700497

Groeschel A, Walther A (2017): Block Copolymer Micelles with Inverted Morphologies. *Angew. Chem. Int. Ed.* **56**, 1572. (Highlight article)

Han K, Go D, Hoenders D, Kuehne AJK, Walther A (2017): Switchable Supracolloidal Coassembly of Microgels Mediated by Host/Guest Interactions. *ACS Macro Lett.* **6**, 310.

Heinen L, Heuser T, Steinschulte A, Walther A (2017): Antagonistic Enzymes in a Biocatalytic pH Feedback System Program Autonomous DNA Hydrogel Life Cycles. *Nano Lett.* **17**, 4989.

Heinen L, Walther A (2019): Temporal control of i-motif switch lifetimes for autonomous operation of transient DNA nanostructures. *Chem. Sci.* **8**, 4100.

Heuser T, Merindol R, Loescher S, Klaus A, Walther A (2017): Photonic devices out of equilibrium: transient memory, signal propagation and sensing. *Adv. Mater.* **29**, 1521. (Selected as VIP paper, highlighted in advancedsciencenews.com).

Keheze F, Raithel D, Wu T, Schiefer D, Sommer M, Hildner R, Reiter G (2017): Signatures of Melting and Recrystallization of a Bulky Substituted Poly(thiophene) Identified by Optical Spectroscopy. *Macromolecules* **50**, 6829–6839.

Knecht V, Reiter G, Reiter R (2017): Thermodynamic origin of multi-layer structures in Langmuir polymer films. *Langmuir* **33**, 11399–11405.

Knecht V, Reiter G, Schlaad H, Reiter R (2017): Structure Formation in Langmuir Peptide Films As Revealed from Coarse-Grained Molecular Dynamics Simulations. *Langmuir* **33**, 6492–6502.

Kurowska M, Eickenscheidt A, Guevara-Solarte DL, Widyaya VT, Marx F, Al-Ahmad A, Lienkamp K (2017): A Simultaneously Antimicrobial, Protein-repellent and Cell-compatible Polyzwitterion Network. *Biomacromolecules* **18**, 1373. DOI: 10.1021/acs.biomac.7b00100

Mao J, Abushammala H, Hettegger H, Rosenau T, Laborie MP (2017): Imidazole, a New Tunable Reagent for Producing Nanocellulose, Part I: Xylan-Coated CNCs and CNFs. *Polymers* **9**(10), 473.

Masselter T, Kempe A, Eckert S, Neinhuis C, Speck T (2017): Comparing structure and biomechanics of extant *Carica papaya* and *Ochroma pyramidalis* stems allows re-evaluating functional morphology of the fossil ‘seed fern’ *Lyginopteris oldhamia*. *Review of Paleobotany and Palynology* **246**, 258–263. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2017.07.007

Merindol R, Walther A (2017): Materials Learning from Life: Concepts for Active, Adaptive and Autonomous Molecular Systems. *Chem. Soc. Rev.* **46**, 5588. (Invited Review for the Chem. Soc. Rev. special issue on “Chemical systems Out of Equilibrium”).

Poppinga S, Daber LE, Westermeier AS, Kruppert S, Horstmann M, Tollrian R, Speck T (2017): Biomechanical analysis of prey capture in the carnivorous Southern bladderwort (*Utricularia australis*). *Scientific Reviews* **7**, 1776. DOI: 10.1038/s41598-017-01954-3

Poppinga S, Zollfrank C, Prucker O, Rühe J, Menges A, Cheng T, Speck T (2017): Towards a new generation of smart biomimetic actuators for architecture. *Advanced Materials*, 1703653. DOI: 10.1002/adma.201703653

Riga EK, Boschert D, Vöhringer M, Widyaya VT, Kurowska M, Hartleb W, Lienkamp K (2017): Fluorescent ROMP Monomers and Copolymers for Biomedical Applications. *Macromol. Chem. Phys.* **218**, 1700273. DOI: 10.1002/macp.201700273

Riga EK, Saar JS, Erath R, Hechenbichler M, Lienkamp K (2017): On the Limits of Benzophenone as Cross-linker for Surface-Attached Polymer Hydrogels. *Polymers* **9**, 686. DOI: 10.3390/polym9120686

Riga EK, Vöhringer M, Widyaya VT, Lienkamp K (2017): Polymer-based Surfaces Designed To Reduce Biofilm Formation – From Antimicrobial Polymers to Strategies for Long-Term Applications. *Macromol. Rapid. Commun.* **38**, 1700216. DOI: 10.1002/marc.201700216

Schmidt SB, Kempe F, Brügner O, Walter M, Sommer M (2017): Alkyl-substituted spirobifluorene: electronic effects, model compounds and synthesis of aliphatic main-chain copolymers. *Polym. Chem.* **8**, 5407–5414. DOI: 10.1039/C7PY00987A

Vöhringer M, Hartleb W, Lienkamp K (2017): Surface Structuring Meets Orthogonal Chemical Modifications: Toward a Technology Platform for Site-Selectively Functionalized Polymer Surfaces and BioMEMS. *ACS Biomater. Sci. Eng.* **3**, 909. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.7b00140

Westermeier AS, Fleischmann A, Müller K, Schäferhoff B, Rubach C, Speck T, Poppinga S (2017): Trap diversity and character evolution in carnivorous bladderworts (*Utricularia*, Lentibulariaceae). *Scientific Reviews* **7**, 12052. DOI: 10.1038/s41598-017-12324-4

## BOOKS AND BOOK-CHAPTERS

Allgaier C, Felbrich B, Wulle F, Khechine E, Nebelsick JH, Menges A, Reiter G, Reiter R, Lechner A, Verl A, Wurst K-H (2017): Schnecken als lebende 3D-Drucker: freie Formen für die Architektur von morgen. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 94–101. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Bunk K, Jonas FA, Born L, Gresser GT, Knippers J, Speck T, Masselter T (2017): Vom Ast zum Palast. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 112–120. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Knippers J, Speck T (2017): Alles beweglich. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 10–11. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Knippers J, Speck T (2017): Editorial. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 4–5. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Knippers J, Speck T (2017): Eleganz und Leichtigkeit – bioinspirierte Kuppeln. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 80–81. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Knippers J, Speck T (2017): Leichte Allesköninger – Struktur statt Masse. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 40–41. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Knippers J, Speck T (2017): Verzweigte Lastträger. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 110–111. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Knippers J, Speck T (2017): Warum Bionik? In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 6–9. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Madl J, Villringer S, Römer W (2016): Delving into Lipid-Driven Endocytic Mechanisms Using Biomimetic Membranes. In: Shukla A. (eds.), *Chemical and Synthetic Approaches in Membrane Biology*. Springer Protocols Handbooks. Humana Press, New York, NY.

Özdemir B, Asgharzadeh P, Birkhold A, Röhrle O, Reski R (2017): Das Plastidenskelett: ein Ideengeber im nano-Bereich. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 121–124. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Poppinga S, Bauer U, Speck T, Volkov AG (2017): Motile traps. In: Ellison AM, Adamec L. (eds.), *Carnivorous plants: physiology, ecology, and evolution*, 180–193. Oxford University Press, Oxford. DOI: 10.1093/oso/9780198779841.003.0014

Schmier S, Bauer G, Buck K, Klang K, Lauer C, Toader N, Gericke O, Haase W, Schäfer I, Schmauder S, Sobek W, Nickel KG, Speck T (2017): Hohe Belastungen sicher überstehen. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 42–61. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Speck O, Caliaro M, Mader A, Knippers J (2017): Pflanzen in Aktion. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 12–19. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

Speck T, Thielen M, Speck O (2017): What can be learnt from ageing in biology and damage tolerant biological structures for long-lasting biomimetic materials? In: van Breugel K, Koleva D, Beek T (eds.), *The Ageing of Materials and Structures*, 27–38. Springer, Cham. DOI.org/10.1007/978-3-319-70194-3\_3

Westermeier A, Poppinga S, Körner A, Born L, Sachse R, Saffarian S, Knippers J, Bischoff M, Gresser G, Speck T (2017): Keine Gelenkbeschwerden – Wie Pflanzen sich bewegen und die Technik inspirieren. In: Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.), *Baubionik – Biologie befähigt Architektur*, 30–39. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

## CONFERENCE PROCEEDINGS

Bischoff M, Sachse R, Körner A, Westermeier A, Born L, Poppinga S, Gresser G, Speck T, Knippers J (2017): Modeling and analysis of the trapping mechanism of *Aldrovanda vesiculosa* as biomimetic inspiration for façade elements. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017*, 9 pp. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

Born L, Westermeier A, Gresser GT, Poppinga S, Speck T (2017): Catching inspiration from the carnivorous plant *Aldrovanda vesiculosa* – The biomimetic façade shading system “Flectofold”. In: Kesel AB, Zehren D (eds.), *Bionik: Patente aus der Natur. Tagungsbeiträge zum 8. Bionik-Kongress in Bremen*, 137–143. Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C), Bremen.

Bunk K, Seitz JM, Jonas F, Knippers J, Speck T, Masselter T (2017): How can branched building structures be optimised via analysing plant branchings? Functional morphology, biomechanics and Finite Element (FE) simulation of Araliaceae ramifications. In: Kesel AB, Zehren D (eds.), *Bionik: Patente aus der Natur. Tagungsbeiträge zum 8. Bionik-Kongress in Bremen*, 40–48. Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C), Bremen.

Hesse L, Masselter T, Spengler N, Korvink JG, Leupold J, Speck T (2017): High-resolution MRI allows for new insights into the mechanics of dragon tree ramifications. In: Kesel AB, Zehren D (eds.), *Bionik: Patente aus der Natur. Tagungsbeiträge zum 8. Bionik-Kongress in Bremen*, 233–240. Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C), Bremen.

Kumar C, Favier D, Speck T, Bohn HF, Le Houérou V (2017): Adhesion Characteristics of Polymeric Plants Leaf Replicas: Influence of Microstructure's Size, Morphology, and Intricacy. *Proceedings of the World Tribology Conference 2017*, Beijing, China.

Mader A, Birkhold A, Caliaro M, Speck O, Röhrle O, Knippers J (2017): Plant-inspired compliant actuation. In: *Proceedings of the 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry*, October 11-13, 2017, Stuttgart, Germany, pp. 233–237.

## EDITORIAL WORK

Gorb S, Speck T (2017): *Biological and Biomimetic Materials and Surfaces*. Editorial of the Special Issue. *Beilstein Journal of Nanotechnology* 8, 403–407. DOI: 10.3762/bjnano.8.42

Knippers J, Schmid U, Speck T (eds.) (2017): *Baubionik - Biologie befähigt Architektur*. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C, Band 82, 152 pp., Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.

## MISCELLANEOUS

Speck T (2017): Von der Natur lernen für die Bauwerke der Zukunft - Bionische Lösungen für Bauwesen und Architektur. *Konferenzberichte S-win-Statusseminar: Neue Anwendungen für Holz*, 21 pp. Akademie Empa Dübendorf (electronically).

## ABSCHLUSSARBEITEN / THESIS

### HABILITATIONEN

Lienkamp, Karen: "Tailor-made Antimicrobial Polymer Surfaces – From Mechanisms to Materials Applications". – Habilitation, Universität Freiburg.

### PROMOTIONEN

Hesse, Linnea: Qualitative and quantitative analysis of plant branchings and their biomimetic potential using the example of *Dracaena marginata*. – Promotion, Universität Freiburg. [Betreuer: T. Speck & T. Masselter]

### DIPLOM-, BACHELOR-, MASTER- UND STAATSEXAMENSARBEITEN

Börnert, Laura: Mechanische Eigenschaften und Funktionsanatomie der Rindenfasern von *Sequoiadendron giganteum*. – Bachelorarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer: G. Bolt & T. Speck]

Carmesin, Cora F.: Über den Fangmechanismus karnivorer Reusenfallen am Beispiel von *Genlisea hispidula*. – Staatsexamensarbeit, Universität Ulm & Universität Freiburg. [Betreuer/in A. Westermeier, S. Poppinga & T. Speck, Universität Freiburg, und M. Klepsch & S. Jansen, Universität Ulm]

Deng, Zhuoling: Organosulfur Polymers – Synthesis, Film formation, and Antimicrobial Properties. – Masterarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: R. Mülhaupt, J. Rühe & K. Lienkamp]

Ferraro, Gianluca: Biomechanik und funktionelle Morphologie der Säule bei *Stylium debile*. – Bachelorarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer: S. Poppinga & T. Speck]

Hechenbichler, Michelle: Synthese und Charakterisierung von abbaubaren Polystyrolsulfonsäureestern. – Masterarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: R. Mülhaupt & K. Lienkamp]

Himmelsbach, Andreas: RAFT-Copolymerisation von amphiphilen Itaconsäurederivaten für antimikrobielle Tests. – Masterarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: R. Mülhaupt & K. Lienkamp]

Hoppe, Lennart: Biomechanische Analysen der Verengungsbewegung der *Aldrovanda*-Falle. – Bachelorarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: A. Westermeier, S. Poppinga & T. Speck]

Kortmann, Tobias: Untersuchung der Verzweigungsgeometrie von *Dracaena marginata* mit biomechanischen Analysen und computergestützten Modellierungstechniken. – Bachelorarbeit, Hochschule Bocholt & Universität Freiburg. [Betreuer/in: L. Hesse, T. Masselter & T. Speck, Universität Freiburg & H. Beismann Hochschule Bocholt]

Krassovitski, Semjon: Functional morphology of branch attachments in *Hedera helix*. – Masterarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: K. Bunk, T. Masselter & T. Speck]

Lehmann, Laura-Sofie: Analysis of leaf growth, biomechanics and anatomy during leaf ontogeny in *Syngonium auritum* (Araceae). – Masterarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: A. Westermeier, S. Poppinga & T. Speck]

Mylo, Max: Establishment of a methodology for 3D plant movement analyses. – Masterarbeit, Universität Gießen & Universität Freiburg. [Betreuer/in: A. Westermeier, S. Poppinga & T. Speck, Universität Freiburg & J. Munzert, Universität Gießen].

Norow, Alexander: Untersuchung des Abbaus von dünnen Filmen aus Poly(sebacinsäureanhydrid)-Copolymeren". – Masterarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: R. Mülhaupt, J. Rühe & K. Lienkamp]

Paschke, Stefan: Barriereeigenschaften von dünnen Filmen aus aromatischen Polymeren". – Masterarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: R. Mülhaupt & K. Lienkamp]

Saßmann, Nele: Entwicklung und biomechanische Eigenschaften der Luftwurzeln von *Clusia torresii*. – Bachelorarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: F. Gallenmüller & T. Speck]

Smajj, Jassir: Beutefanganalyse bei der karnivoren Pflanzenart *Aldrovanda vesiculosa*. – Bachelorarbeit, Universität Freiburg. [Betreuer/in: A. Westermeier, S. Poppinga & T. Speck]

## FIT-KOLLOQUIUM 2017

### Programm

#### 5. FIT-Kolloquium am Freitag, den 10.02.2017

##### ab 09:00 Empfang

- 9:30 **Uwe Pelz** (Woias)  
Mikroverfahrenstechnik zur Herstellung nanoskaliger, thermoelektrischer Materialien und additive Fertigung thermoelektrischer Mikro-Generatoren -  $\mu$ SynTEG
- 9:40 **Katharina Bunk** (Speck)  
Quantitative and qualitative biomechanics of *Schefflera arboricola* ramifications in combination with Finite Elemente (FE) simulations
- 9:50 **Lukas Zielke** (Thiele)  
Imaging Carbon Binder Domains - ALD Contrasted Tomography
- 10:00 **Raisa Kociurzynski** (Reiter/Knecht)  
Aggregation of membrane-associated molecules
- 10:10 **Anna Westermeier** (Speck)  
Catching inspiration from the carnivorous plant *Aldrovanda vesiculosa* - The biomimetic façade shading system „Flectofold“
- 10:20 **Michael Henze** (Rühe)  
Grafting Through: Polymerization Reactions with Surface-Attached Monomers
- 10:30 **Julia Meier** (SG WissInfo FMF)  
LabLog – das elektronische Betriebsbuch

##### 10:45 – 11:15 Kaffeepause

- 11:20 **Raimund Rother** (Technologieplattform 2, Müller)  
Reaktivlamination von chemisch inkompatiblen Polymerfolien
- 11:30 **Charchit Kumar** (Speck)  
A Technique to Investigate Adhesion and Friction on Biological Microstructured Surfaces; Coupled with In-situ Real Contact Visualization
- 11:40 **Esther K. Riga** (Lienkamp)  
Selbstregenerierende Antimikrobielle Oberflächen durch Multilagen-Design mit Abbaubaren Zwischenschichten
- 11:50 **Ramin Omidvar** (Römer)  
Mechanical properties of Giant Liposomes indented by Atomic Force Microscopy spherical tip
- 12:00 **Simon Thiele** (Thiele)  
From Biological Tissue to Quasi in Operando Cryo Imaging - Input of Porous Media Group to FIT and Presentation of Currently Relevant ProjectP

- 12:10 **Roland Hönes** (Rühe)  
Nickel Nanoneedles: Resistivity of Superhydrophobicity
- 13:30 **Georg Bauer** (Speck)  
Energy dissipating tree bark as source of inspiration for impact protection in architecture
- 13:40 **Matthias Klingele** (Thiele)  
Catalysis of the Oxygen Reduction Reaction on Doped Carbon Materials
- 13:50 **Vania T. Widyaya** (Lienkamp)  
Bioactive Polymer Surfaces by Microcontact Printing
- 14:00 **Andreas Walther**  
Self-Assemblies with Programmable Lifetimes and Autonomously Dynamic Soft Materials
- 14:10 **Jing Becker** (Technologieplattform 2, Müller)  
Generating Micro- and Nanostructures on Polymeric Surfaces
- 14:20 **Taras Sych** (Römer)  
Plasma membrane reorganizations induced by the bacterial lectin LecA of *Pseudomonas aeruginosa*
- 14:30 **Nico Tucher** (Glunz)  
Advanced Optics for Solar Cells
- 14:40 – 15:05 Kaffeepause**
- 15:10 **Michael Walter** (Technologieplattform 3, Moseler)  
Mechanochemistry in molecular levers: which bond breaks first?
- 15:20 **Martin Körner** (Rühe)  
The kinetics of C,H-insertions based crosslinking (CHic)
- 15:30 **Stefanie Schmier** (Speck)  
Functional morphology and mechanical properties of the endocarp of *Cocos nucifera*
- 15:40 **Jia Mao** (Laborie)  
Bionische Lignocellulose-basierte Komposite mit innovativem Verarbeitungskonzept
- 15:50 **Karl Wienands** (Glunz)  
Evaporated Perovskite Absorbers for Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells
- 16:00 **Yi Thomann** (Technologieplattform 1, Mülhaupt)  
Technologieplattform 1: Aufbau eines Kompetenznetzes zur 3D-Visualisierung und eines Speziallabor für Mikroskopie und Tomografie
- 16:10 Ende für das Auditorium, Kaffeepause**
- 16:30 Mitgliederversammlung**

## IMPRESSUM

Das Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Redaktion: Dr. Olga Speck

Druck: Druckerei der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

---

ISBN: 987-3-946018-03-2