



Report 2015

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

REPORT

2015

FIT

FREIBURGER ZENTRUM FÜR
INTERAKTIVE WERKSTOFFE UND
BIOINSPIRIERTE TECHNOLOGIEN



FIT

FIT
FREIBURGER ZENTRUM FÜR INTERAKTIVE WERKSTOFFE
UND BIOINSPIRIERTE TECHNOLOGIEN

FREIBURG CENTRE FOR INTERACTIVE MATERIALS AND
BIOINSPIRED TECHNOLOGIES

Georges-Köhler-Allee 105

D-79110 Freiburg

T: (+49) 761 203 67879

F: (+49) 761 203 4709

E: mail@fit.uni-freiburg.de

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

Sekretariat: Antonia Duma

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Rolf Mülhaupt

Verwaltungsleiterin: Dr. Stefanie Meisen

Wissenschaftliche Koordinatorin: Dr. Olga Speck

Titelbild: „Transform“ von Daniel Widrig, © Olga Speck, FIT, 2016

ISBN: 987-3-946018-01-8

Inhaltsverzeichnis

FIT	2
Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien	6
Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies	6
Das Kunstwerk im FIT	8
The Work of Art in FIT	9
Zukunftsfelder am FIT / Future Fields at FIT	10
Struktur.....	10
Forschungsfelder.....	10
Research Areas.....	10
Technologieplattformen	11
Technology Platforms.....	11
Leitung / Management	11
Direktorium / Directorate	12
Mitglieder / Members.....	12
Wissenschaftlicher Beirat / Scientific Board	13
Internes Beratungsgremium / Integrative Board	13
Finanzen	14
Finances	14
Highlights	15
Pflanzen und Tiere als Ideengeber für Energiedissipation in lasttragenden Systemen und Fassaden – Skalierungseigenschaften von hochporösen biologischen und biomimetischen Konstruktionen	15
Plants and animals as source of inspiration for energy dissipation in load bearing systems and facades – Scaling of properties of Highly Porous Biological and Biomimetic Constructions.....	18
Adaptive Steifigkeit und gelenkfreie Bewegung bei stabförmigen Pflanzenorganen als Ideengeber für adaptive Baukonstruktionen.....	20
Adaptive stiffness and joint-free kinematics in rod-shaped plant organs as concept generators for adaptive building constructions	23
Kinematik planarer, gekrümmter und gewellter Pflanzenstrukturen als Ideengeber für bewegliche Strukturen in der Architektur	25
Kinematics of planar, curved and corrugated plant surfaces as concept generators for deployable systems in architecture	27
Die Verzweigung von <i>Schefflera arboricola</i> als Ideengeber für die Optimierung lastadaptierter faserverstärkter Kunststoffrohre in verzweigten Tragwerkstrukturen	29

The ramification of <i>Schefflera arboricola</i> as concept generator for the optimization of load-adapted fibre-reinforced polymer tubes in branched building structures	32
Kontinuierliche Gebäudehüllenextrusion auf der Basis der Schneckenschalenbildung.....	34
Continuous fused deposition modelling of architectural envelopes based on the cell formation of molluscs	37
Wechselwirkung von Zellen mit nano- und mikrostrukturierten Oberflächen.....	38
The interaction of cells with nano and microstructured surfaces	40
Adhäsion und Reibung auf mikrostrukturierten Oberflächen: Inspiration von Insekt-Pflanze Interaktionen	42
Adhesion and Friction on Textured Surfaces: Inspiration from Insect-Plant Interactions	45
Bionische Lignocellulose-basierte Komposite mit innovativem Verarbeitungskonzept (LIGNOSIT).....	47
Bionic Lignocellulose-Based Composites using Innovative Processing Concept (LIGNOSIT).....	50
Thermodynamik von Membranen mit komplexer Lipidzusammensetzung	51
Thermodynamics of membranes with complex lipid compositions	53
Projekte.....	55
SFB-TRR 141	55
Ein Jahr „SFB-Transregio 141:Biologisches Design und integrative Strukturen - Analyse, Simulation und Übertragung in die Architektur“	55
One year of „SFB-Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture	58
IRTG 1642.....	60
Internationales Graduiertenkolleg (IRTG) "Weiche Materie: Von molekularen Kräften zu neuen Materialien“	60
International Research Training Group (IRTG) “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials”	63
ERC Starting Grant “REGENERATE“	66
Selbstregenerierende Antimikrobielle Oberflächen – Entwicklung einer Technologieplattform für Neue Materialien und Devices.....	66
Self-regenerating Antimicrobial Surfaces – Towards a Technology Platform for New Materials and Devices	68
FIT-Kolloquium 2015.....	71
Publikationen / Publications.....	72
Impressum	74

FREIBURGER ZENTRUM FÜR INTERAKTIVE WERK- STOFFE UND BIOINSPI- RIERTE TECHNOLOGIEN

Liebe Leser,

Ende 2015 konnte am FIT eine neue Ära eingeläutet werden: Am 22.12.2015 wurde der Forschungsbau bezugsfertig übergeben. Jetzt lebt das FIT in den speziell für die geplante Forschung eingerichteten Räumen.

Einige Gruppen haben sofort begonnen die Räume zu nutzen, einzurichten und umzugestalten, andere kommen im Frühjahr. Schon im Vorfeld sind alle Mitglieder sehr aktiv gewesen und haben Projekte beantragt und eingeworben, neue Kooperationen aufgestellt und das Kommunikationsnetz erweitert. Wir freuen uns, dass wir mit so vielen Gruppen das Haus füllen können. Dabei ist es erfreulich so viele Nachwuchsgruppen dabei zu haben.

Jetzt steht die Vernetzung der Gruppen, wissenschaftlich und sozial, im Fokus der im FIT angesiedelten Gruppen, um neue, innovative Ideen zu entwickeln und das Forschungsprogramm den neuesten gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Entwicklungen anzupassen.

Als fakultäts- und fachübergreifendes Zentrum ist es ein zentrales Ziel von FIT eine Brücke zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften zu bauen. In diesem Zusammenhang wird darauf geachtet, dass ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den beteiligten Fachdisziplinen gewahrt wird. Gleichzeitig ist die Erforschung von interaktiven Funktionsmate-

rialien und intelligenten Systemen, die sich am Vorbild der Natur orientieren maßgebend.

Freiburg, 9.2.2016



Stefanie Meisen

(Verwaltungsleitung)

FREIBURG CENTRE FOR INTERACTIVE MATERIALS AND BIOINSPIRED TECH- NOLOGIES

Dear reader,

at the end of the year 2015 a new era begun at the FIT: on December, 22nd 2015 the research building has been committed to the University ready for occupancy. Now the FIT lives in the rooms, which are especially planned and designed for our research.

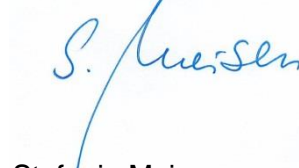
Some of the project groups immediately moved in and started to use, furnish and rearrange the rooms, others will join in spring. All the members were already very active and applied for and raised project funds, established new cooperation and expanded their communication networks. We are very happy to welcome that many project groups in our building. It's exceptionally delightful, that there are many junior researcher groups involved.

Now the focus will lie on the scientific and social interconnection of the several groups, to develop new and innovative ideas and to adjust the research program to the current social and scientific developments.

As a cross-faculty and interdisciplinary working center it's the major purpose of the FIT to build a bridge between natural science and engineering science. In this context a well-balanced relation between the participating disciplines is taken care

of. At the same time the research of interactive materials and intelligent systems, which are oriented towards the example of nature, is determining the work.

Freiburg, 9.2.2016



Stefanie Meisen

(Administrative management)

DAS KUNSTWERK IM FIT

„Transform“ von Daniel Widrig

Der Architekt und Designer Daniel Widrig hat das Kunstwerk „Transform“ geschaffen, das im zentralen Atrium des FITs zu schweben scheint (Abb. 1). Die Grundformen des Kunstwerks wurden im Gebäude aufgenommen und finden sich an den Glastüren (Abb. 2).



Abb. 1: Kunstwerk „Transform“ im Atrium des FIT. © Olga Speck, FIT

Daniel Widrig ist Architekt und studierte zunächst an der FH Nürnberg, später an der Architectural Association School of Architecture in London bevor er mehrere Jahre mit viel Erfolg im Büro von Zaha Hadid arbeitete. Er erhielt eine Vielzahl von Preisen für seine Arbeiten. [1,2]

Im Rahmen des Kunst-am-Bau-Wettbewerbs waren zunächst 252 Bewerbungen eingegangen. Im anschließenden Realisierungswettbewerb wurde die abstrakte Skulptur des in Nürnberg geborenen und nun in London arbeitenden Künstlers mit dem ersten Preis prämiert und für das FIT ausgewählt. Das 250 kg schwere Kunstwerk „Transform“ hat mit einer Länge und Breite von jeweils 3,80

Metern und einer Höhe von 3,20 Metern imponierende Ausmaße.



Abb. 2: Glastür im FIT. © Olga Speck, FIT

Hochinteressant sind die geometrischen Grundformen, die durch ihre geschwungene Form zu unterschiedlichsten Assoziationen und Interpretationen bei den Gästen und Wissenschaftler führen, die aus unterschiedlichsten Wissenschaftsdisziplinen stammen und im Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien zusammenarbeiten. [3]

Mehr über Daniel Widrig und seine Arbeiten erfahren Sie auf seiner Internetseite: <http://www.danielwidrig.com/>.

Literatur

[1] <http://www.danielwidrig.com/> (abgerufen am 27.01.2016)

[2] <http://kunstnuernberg.de/die-ausstellung-family-business-von-hanspeter-und-daniel-widrig/> (abgerufen am 27.01.2016)

[3] <http://www.prokulturhauptstadt-freiburg.de/wp-content/uploads/2015/05/Juli.pdf> (abgerufen am 27.01.2016)

Assoziationen zu „Transform“

Einige ausgewählte Reaktionen und Interpretationen zum Kunstwerk „Transform“ wollen wir Ihnen hier präsentieren:

Und noch was zum Schmunzeln: Die Rezension meiner Tochter (2 1/2 Jahre) unseres "Kunstwerks":
Miriam: "S'n das da?"
Mama: "Das ist eine Skulptur, ein Kunstwerk. Das soll es hier schöner machen."
Miriam (enttäuscht): "Kann man da nich darauf reit'n"

„Ein modernes Diabolo“
„stellt vermutlich Graphen dar, ...“
„Dynamische Stabilität in der natürlichen Form – künstlerisch dargestellt“
„(Mathematischer) Sattelpunkt“
„Leitbündel – Xylem, Phloem“
„Visualisierung des metastabilen Zustands des FIT-Gebäudes bei äußeren Einflüssen wie zum Beispiel: Wind“

THE WORK OF ART IN FIT

‘Transform’ realized by Daniel Widrig

Architect and designer Daniel Widrig has created the work of art “Transform”, which appears to float in the central atrium of FIT (Fig. 1). The geometric basic shape of the work of art has been integrated in the building and can be found on the glass doors (Fig. 2).

Daniel Widrig first studied at the University of Applied Sciences in Nürnberg, then he graduating from the Architectur-

al Association School of Architecture in London and worked successfully for several years with Zaha Hadid. Over the years he has received numerous awards for his work. [1,2]

In the formwork of the contest for art-in-architecture 252 applications have been received. In a subsequent invited competition the abstract sculpture of the designer, who was born in Nuremberg and now has a studio in London, was awarded with the first prize. In total, the 250 kg heavy sculpture ‘Transform’ is of very impressive dimensions with a total length of 3.8 meters, a total width of 3.8 meters and a height of 3.2 meters. Particularly interesting are the basic geometric shapes arranged in a curved form, which create a variety of interpretations and associations for the guest and scientists coming from various academic disciplines and cooperating in the Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies. [3]

You can find out more about Daniel Widrig and his work on the homepage: <http://www.danielwidrig.com/>.

Fig 1: The work of art ‘Transform’ in the atrium of FIT. © Olga Speck, FIT

Fig. 2: Glass door in FIT. © Olga Speck, FIT

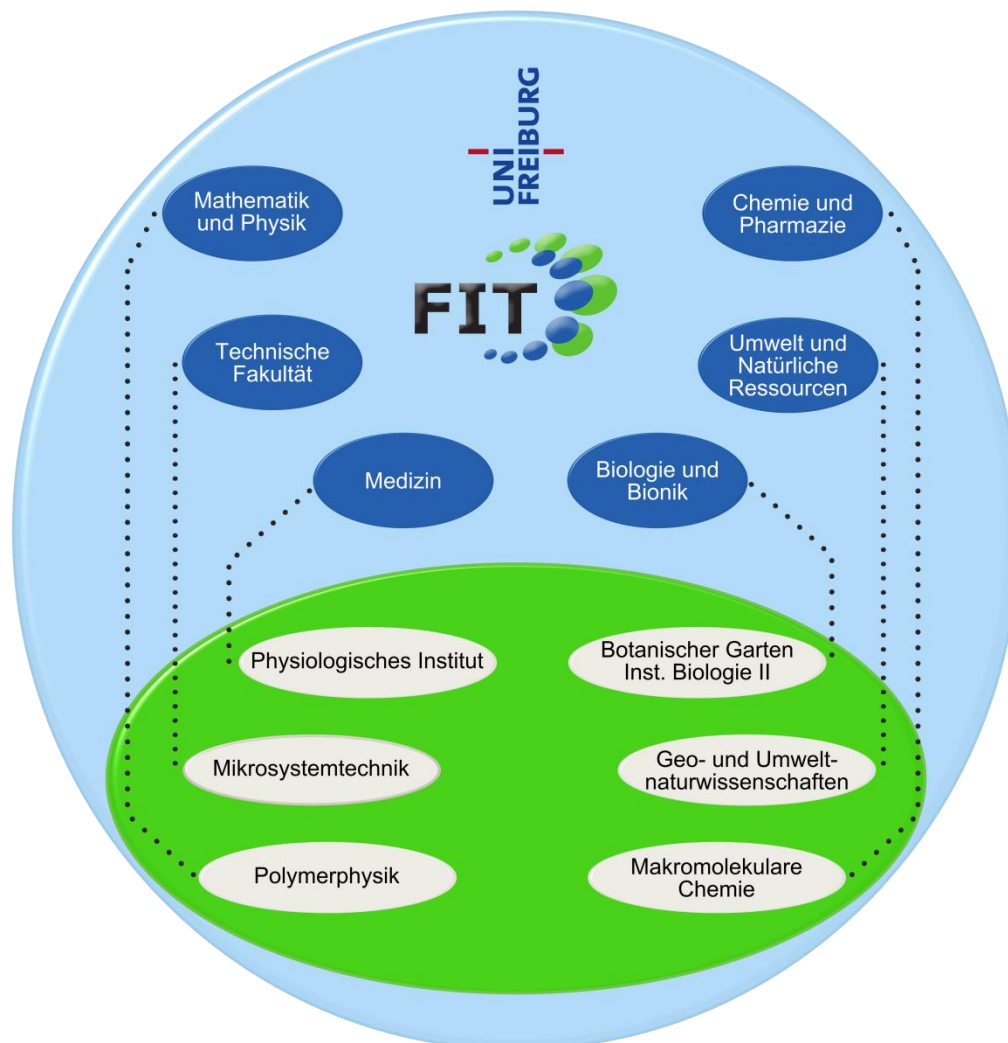
Associations with ,Transform‘

Some reactions and interpretations with the work of art ‘Transform’ will be presented here:

«Marine Plant»
«Structure inspired from Honey Comb. with cleaning surface»
«Is it tissue?»
«Saddle point?»

ZUKUNFTSFELDER AM FIT / FUTURE FIELDS AT FIT

STRUKTUR



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

TECHNOLOGIEPLATTFORMEN

- **Technologieplattform 1**
 - 3D-Visualisierung mit Speziallabor für Mikroskopie und Tomografie, Aufbau eines Kompetenznetzwerkes
 - Wissenschaftlicher Leiter der TP 1: Prof. Dr. Rolf Mülhaupt
 - Verantwortliche Managerin der TP 1: Dr. Yi Thomann
- **Technologieplattform 2**
 - Fertigungstechnik für bioinspirierte Materialien mit Schwerpunkten auf Nanolithografie-, Folien- und 3D-Druck-Technologien
 - Wissenschaftlicher Leiter der TP 2: Prof. Dr. Claas Müller
 - Verantwortliche Managerin der TP 2: Dr. Jing Becker
- **Technologieplattform 3**
 - Konzeptentwicklung, Modellierung und Simulation interaktiver Materialien
 - Wissenschaftlicher Leiter der TP 3: Prof. Dr. Michael Moseler
 - Verantwortlicher Manager der TP 3: PD Dr. Michael Walter

TECHNOLOGY PLATFORMS

- **Technology Platform 1**
 - Network of competence 3D visualization with specialized laboratory for microscopy and tomography
 - Scientific head of TP 1: Prof. Dr. Rolf Mülhaupt
 - Responsible manager of TP 1: Dr. Yi Thomann
- **Technology Platform 2**
 - Manufacturing technique for bioinspired materials with focus on nano-

lithography, film technology, and generative processes

- Scientific head of TP 2: Prof. Dr. Claas Müller
- Responsible manager of TP 2: Dr. Jing Becker

- **Technology Platform 3**

- Concept development, modelling and simulation of interactive materials
- Scientific head of TP 3: Prof. Dr. Michael Moseler
- Responsible manager of TP 3: PD Dr. Michael Walter

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)
FMF

Dr. Rainer Giersiepen
(Kommissarische Technische Leitung)
Technische Fakultät

Dr. Olga Speck
(Wissenschaftliche Koordination)
Fakultät für Biologie

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 am 01.08.2012 bestellten Gründungsdirektoriums 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 die drei Technologieplattformen dauerhaft installiert. Im Jahr 2014 waren 12 wissenschaftliche Mitglieder der Albert-Ludwigs-Universität und des Universitätsklinikums im FIT aktiv.

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

Dr. Holger F. Bohn (Fakultät für Biologie)

Prof. Dr. Stefan Glunz (Technische Fakultät)

Dr. Volker Knecht (Fakultät für Mathematik und Physik)

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. 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 Rühle (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)
Dr. Ralf Thomann (FMF)
Dr. Yi Thomann (FIT)
Dr. Michael Walter (FMF)
Prof. Dr. Peter Woias (Technische Fakultät)
Prof. Dr. Roland Zengerle (Technische Fakultät)

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT / SCIENTIFIC BOARD

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

Prof. Dr. Eduard Arzt (Universität des Saarlandes und Leibniz Institut für Neue Materialien)
Prof. Dr. Clothilde Boulanger (Université de Lorraine, Frankreich)
Prof. Dr. Ingo Burgert (ETH Zürich, Schweiz)
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.

Sprecher / Spokesperson: Prof. Dr. Wolfgang Driever (Dekan der Fakultät für Biologie)

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. Kerstin Kriegelstein (Dekanin der Medizinischen Fakultät)

Prof. Dr. Dietmar Kröner (Dekan der Fakultät für Mathematik und Physik)

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

Prof. Dr. Georg Lausen (Dekan der Technischen Fakultät)

Highlights

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

Dr. Bruno Ehmann (Leiter Freiburger Research Services)

Dr. Stefanie Meisen (Verwaltungsleiterin des FIT)

N.N. (Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats)

FINANZEN

Im Jahr 2015 wurden am FIT acht Projekte durchgeführt. Dabei hatten wir ein Ausgabevolumen von 2,69 Mio. Euro. Durch die Erstausrüstung ist ein Großteil der Gelder vom Land finanziert. 50 % des Ausgabevolumens wurden jedoch über Projekte abgewickelt.

Das FIT verfügt nur über drei etatisierte Stelle: Eine 25 % Stelle für die Verwaltungsleitung, eine 100 % Stelle für die Assistenz und eine 50 % Stelle für die wissenschaftliche Koordination. Des Weiteren ist, nachhaltig zum Projekt BITS, eine wissenschaftliche Stelle für die Technologieplattform 1 zu 100 % unbefristet, mit einer Finanzierung über Drittmittel, ab 2018 zugesagt. Für die Stelle der wissenschaftlichen Koordination hat die Fakultät für Biologie eine Zusage aus dem Fakultätsetat gemacht. Die notwendige technische Unterstützung erhalten wir vom TGM und von den Hausmeistern am Flugplatz. Ein Teil wird immer noch von der Technischen Fakultät übernommen.

Der Anteil der Personalausgaben am Gesamthaushalt lag bei 35 %. Das FIT betreute im Berichtsjahr 14 Principal Investigators (PI), 24 Doktoranden/-

innen, vier Postdocs, zwei technische Assistent/innen, vier Hilfwissenschaftler (Bachelor) und zwei Hilfwissenschaftler (Master).

FINANCES

In 2015 eight projects were processed at the FIT. With these projects we had total expenses of 2.69 Mio Euro. Because of the initial fitting-out of the building the major amount of the funds has been financed by the state. However, 50 % of the expenses were transacted via the research projects.

There are three budgetary positions: One with 25 % for the Administrative Management, one with 100 % for the Administrative Assistance and one with 50 % for the Scientific Coordination. In addition, there is, sustainable to the project BITS, a promised open-ended 100 % position for the Technology Platform 1, which is to be financed with third-party funding beginning with the year 2018. For the position of the Scientific Coordinator the Faculty of Biology made a commitment to finance it from the faculty budget. The Technical Building Management and the facility managers at the Campus Flughafen give the necessary technical support. A part of the technical support is still inherited by the Faculty of Engineering.

The share of staff expenditures in the total budget was 35 %. The FIT hosted in the reporting year 14 Principal Investigators (PI), 24 PhD students, four Postdocs, two technical assistants, four research assistants with Bachelor degree and two research assistants with Master degree.

HIGHLIGHTS

Pflanzen und Tiere als Ideengeber für Energiedissipation in lasttragenden Systemen und Fassaden – Skalierungseigenschaften von hochporösen biologischen und biomimetischen Konstruktionen

S. Schmier^{1,2}, G. Bauer^{1,2}, M. Thielen¹,
T. Speck^{1,2}

¹Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg,

²Freiburger 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“ – Projekte A02 und B01

Die Entwicklung von Bauteilen mit verbesserten Eigenschaften bezüglich Leichtbau, Energiedissipation und punktueller Widerstandsfähigkeit gewinnt im Bauwesen immer mehr an Bedeutung. In der Biologie findet man viele Strukturen, die meist sogar mehrere dieser Eigenschaften im Verlauf der Evolution ausgebildet haben. Momentan dienen Seeigelstacheln (untersucht von Mineralogen der Universität Tübingen, PI: Prof. Klaus Nickel), das Endokarp der Kokosnuss und die Borke verschiedener Bäume (untersucht von Botanikern und Biomechanikern der Universität Freiburg, PI: Prof. Thomas Speck) als Ideengeber. Parallel zu mechanischen und funktionsanatomischen Untersuchungen der biologischen Vorbilder wird an der Zusammensetzung und Strukturierung von Beton geforscht, auf den als wichtigsten Baustoff die von den biologischen Vorbildern abstrahierten Ideen übertragen

werden sollen (untersucht von Ingenieuren und Architekten der Universität Stuttgart, PI: Prof. Werner Sobek). Des Weiteren wird der Transfer und die Abstraktion der biologischen Strukturen auf die Bauelemente durch Computersimulationen unterstützt (durchgeführt von Materialforschern und Mathematikern der Universität Stuttgart, PI: Prof. Siegfried Schmauder).

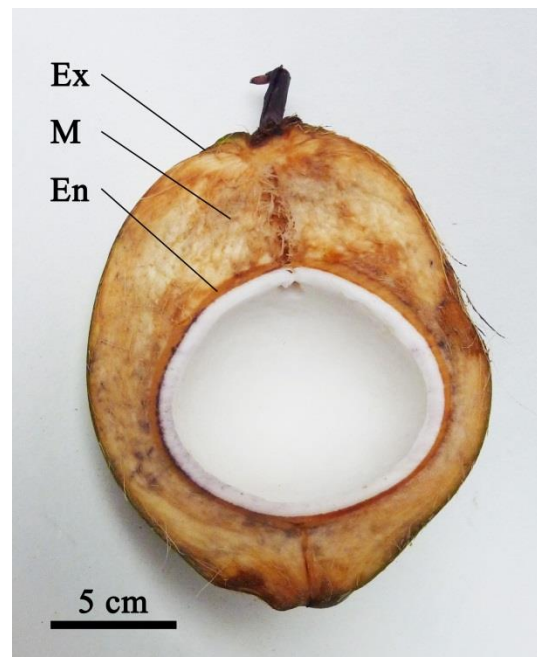


Abb. 1: Aufgeschnittene, junge Frucht der Kokospalme (*Cocos nucifera*). Exokarp (Ex), Mesokarp (M) und Endokarp (En) umgeben das Fruchtfleisch (weiß) mit dem Embryo. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Aus diesem interdisziplinären bionischen Ansatz ergibt sich aber auch eine große Herausforderung: Die Größenverhältnisse und – zumindest bei den botanischen Beispielen – auch die Materialien der ausgewählten Vorbilder unterscheiden sich grundlegend von denen der technischen Baustoffe und Konstruktionselemente. Aus der Literatur ist bekannt, dass einfaches Hochskalieren von sprö-

den Strukturen jedoch eine Schwächung der mechanischen Eigenschaften der Bauelemente (bedingt durch eine größere Fehleranfälligkeit) zur Folge hätte (z.B. [1, 2]).

Ziel dieser interdisziplinären Zusammenarbeit ist daher, zum einen strukturelle Merkmale herauszuarbeiten, welche die oben genannten Eigenschaften (Leichtbau, Energiedissipation und punktuelle Widerstandsfähigkeit) unterstützen und diese auf technische Bauelemente – beispielsweise Wände oder Träger – zu übertragen. Zum anderen soll in Hinsicht auf die Größenskalierung erforscht werden, ob dieses aus der technischen Materialforschung beschriebene Skalierungsproblem auch bei nicht spröden biologischen Strukturen bzw. Materialien auftritt und ob es Mechanismen gibt diesem entgegenzuwirken. Die Früchte der Kokospalme (*Cocos nucifera*) wurden als eine der botanischen Vorbildstrukturen ausgewählt. Sie können im reifen Zustand ein Gewicht von bis zu 3,7 kg erreichen und müssen Stürze aus bis zu 30 m unbeschadet überstehen, damit in ihnen der Keimling heranwachsen kann (außerdem bleiben sie auch nach oft monatelangem Transport in Salzwasser keimfähig). Diese Eigenschaften werden durch die Struktur der dreischichtigen Fruchtwand erreicht, die den Samen schützt: das ledrige Exokarp, das faserige Mesokarp und das harte Endokarp [3, 4, 5] (Abb. 1).

Aktuell wird die Mechanik des harten Endokarps mit Schlagpendelversuchen auf seine Schlagzähigkeit untersucht (Abb. 2A). Der Versuchsaufbau wurde dem für technische Materialien entwickelten Aufbau nach Charpy so weit wie möglich nachempfunden. Aufgrund der gekrümmten Form des Kokosnuss-

Endokarps wurde die Probengeometrie bei den im Folgenden beschriebenen Versuchen jedoch auf einen ungekerbten Bogen abgeändert, anstelle eines geraden Balkens beim typischen Charpy-Versuch (Abb. 2B). Für die Tests wurden Proben in zwei Orientierungen aus dem Endokarp präpariert, die als meridional und äquatorial charakterisiert werden (Abb. 2C).

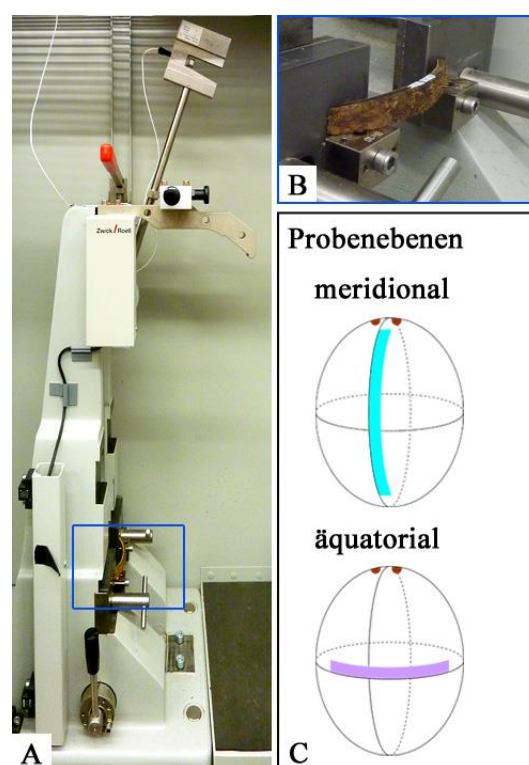


Abb. 2: Schlagpendelversuche: Schlagpendelgerät mit platzierter Endokarp-Probe (A); Detailaufnahme der Probenplatzierung aus A (B); Schematische Darstellung der ursprünglichen Orientierung der Proben in der Kokosnuss (C). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Erste Versuchsreihen zeigen, dass die äquatorialen Proben eine höhere Schlagzähigkeit besitzen, als die meridionalen. Dies deutet daraufhin, dass innerhalb des Endokarps strukturelle Unterschiede zu finden sind, wie beispielsweise ein unterschiedlicher Verlauf der

Leitbündel oder eine unterschiedliche Zellorientierung und -verteilung. Diese Unterschiede, welche die mechanische Anisotropie des Kokosnussendokarps und die komplexen Kraft-Zeit-Kurven der Schlagpendelversuche bedingen (Abb. 3), genauer zu charakterisieren ist ein Ziel künftiger funktionsanatomischer Untersuchungen.

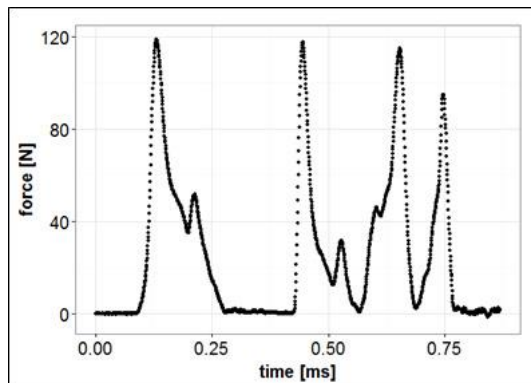


Abb. 3: Typische Kraft-Zeit-Kurve eines Schlagpendelversuchs an einer Endokarp-Probe der Kokosnuss. Das komplexe Kraftmuster, welches auf die hierarchische Strukturierung des Endokarps zurückzuführen ist, ist gut erkennbar. Aus [5]. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Als weiteres botanisches Vorbild für stark energieabsorbierende Baumaterialien dient die Borke von Bäumen. Dabei liegt der Fokus vor allem auf solchen Baumarten, die in Verbreitungsgebieten mit regelmäßig auftretenden Steinschlägen vorkommen. Ein Beispiel ist der Riesenmammutbaum (*Sequoiadendron giganteum*), dessen dicke und stark strukturierte Rinde (Abb. 4) neben Waldbränden auch vor Verletzungen durch Steinschläge in der bergigen Sierra Nevada Kaliforniens schützt. Mit ihrem hohen Energieabsorptionsvermögen verhindert die Rinde des Riesenmammutbaums eine Beschädigung des überlebenswichtigen Kambiums während Steinschlägen [5].



Abb. 4: Die stark strukturierte und dicke Rinde schützt das Kambium des Riesenmammutbaumes bei Waldbränden und vor Verletzungen durch Steinschläge. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Die mechanischen Eigenschaften der Rinde des Riesenmammutbaums werden durch Impakttests untersucht. Erste Versuchsreihen ergaben eine Energieabsorption von bis zu 90 % (Abb. 5). Diese Werte liegen deutlich über denen, welche für Rinden von Bäumen aus Habitaten ohne Steinschläge gemessen wurden.

Zusammenfassend sorgt in all den genannten biologischen Vorbildern eine faserige und mehrschichtige hierarchische Strukturierung der zugrundeliegenden Materialien für eine hohe Energieabsorption und dient daher als Vorbild für eine Übertragung in betonbasierte technische Bauelemente.

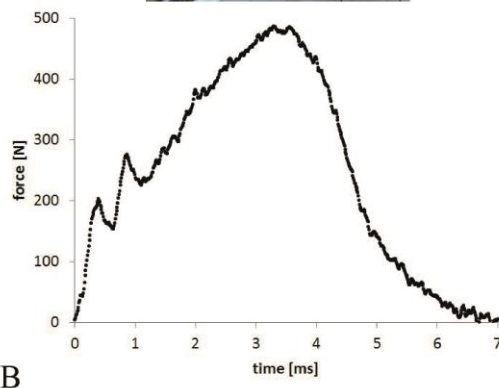
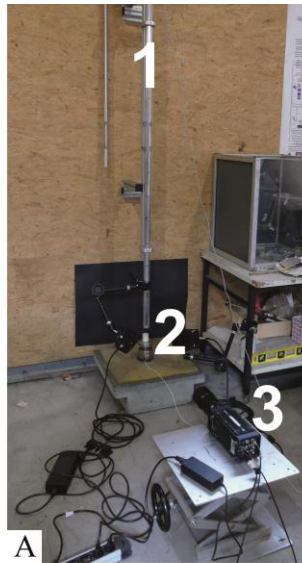


Abb. 5: (A) Testaufbau für Impaktuntersuchungen wie sie an Rindenproben des Riesenmammutbaums durchgeführt wurden; (1) Führungsrohr für das Impaktorgewicht, (2) instrumentierter Amboss, (3) Hochgeschwindigkeitskamera. (B) Typische Kraft-Zeit-Kurve eines Impakttests mit 3,8 J Impaktenergie an einer Rindenprobe des Riesenmammutbaums. Aus [5]. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Literatur

[1] Z. P. Bažant, *Int J Solids Struc* 37.1, 69-80, (2000)
 [2] R. Danzer, P. Supancica, J. Pascuala & T. Lubea, *Eng. Fract. Mech.* 74, 2919-2932, (2007)
 [3] R. Lieberei & C. Reisdorff, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, (2012)

[4] C. Edward & C. R. Elevitch, *Species Profiles for Pacific Island Agroforestry*, 1-27, (2006)

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

Plants and animals as source of inspiration for energy dissipation in load bearing systems and facades – Scaling of properties of Highly Porous Biological and Biomimetic Constructions

S. Schmier^{1,2}, G. Bauer^{1,2}, M. Thielen¹, T. Speck^{1,2}

¹Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg, ²Freiburg Centre for Integrative Materials and Bioinspired Technologies (FIT)

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

For the building industry the development of structures with the capacity of being light weight or exhibiting a high energy dissipation and locally adapted puncture resistance increasingly gains in importance. Source of ideas for these concepts can be found in biology, as there exist examples which have evolved one or even more of these properties. Among these examples are spines of different sea urchins (currently investigated by mineralogists of the University of Tübingen, PI: Prof. Klaus Nickel), the endocarp of the coconut and the bark of various trees (currently investigated by botanists and biomechanists of the University of Freiburg, PI: Prof. Thomas Speck). In addition to the anatomical and mechanical analysis of

the biological role models, research on the composition and structuring of concrete representing the major building material, to which the ideas abstracted from the biological role models will be transferred, is done by engineers and architects of the University of Stuttgart (PI: Prof. Werner Sobek). The transfer and abstraction process of the biological structures to the constructional elements is supported by computer simulations, performed by material scientists and mathematicians of the University of Stuttgart (PI: Prof. Siegfried Schmauder). One challenge arises from the interdisciplinary biomimetic approach: the dimensions and – at least in case of botanic examples – also the materials of the selected biological role models differ markedly from the final building constructional elements. It is well known from the literature that a simple upscaling of brittle structures would result in a weakening of the constructional elements as they would be more prone to failure (e.g. [1, 2]).

Central aim of this collaboration is on the one hand the identification of structural parameters which enhance the constructional elements – e.g. walls and supports – with regard to the above mentioned properties (light weight, high energy dissipation and locally adapted puncture resistance). On the other hand shall be evaluated whether such a scaling law as described for technical materials also exists for biological non-brittle samples and if there are mechanisms to avoid such scaling effects.

Ripe fruits of the coconut palm (*Cocos nucifera*) have been selected as one of the botanical role models. They weight up to 3.7 kg and have to withstand high energy impacts when dropping from heights of up to 30 m to assure the ger-

mination of the seedling (in addition they remain germinable even after several months of dispersal in seawater). These properties are ensured by the triple-layered structure of the fruit wall protecting the seed: the leathery exocarp, fibrous mesocarp and tough endocarp [3, 4, 5] (Fig. 1). Currently the biomechanical properties of the tough endocarp are examined. Tests are performed with an impact pendulum to define the impact resistance of the endocarp material (Fig. 2A). The experimental setup has been inspired by the setup developed by Charpy for technical materials. Because of the curvature of the endocarp the shape of the samples has to be chosen as arches (Fig. 2B) instead of straight beams, a requirement for a typical Charpy test. The samples were cut out of the endocarp in two orientations, characterized as meridional and equatorial (Fig. 2C). First results reveal that the equatorial samples have a higher impact resistance, than the meridional ones. These results indicate the existence of structural differences within the endocarp, such as a different course of the vascular bundles or a varying cell-orientation and cell-distribution. To characterize in detail these differences causing the anisotropy of the coconut endocarp and the complex force-time-curves found in impact pendulum tests (Fig. 3) is one goal of future anatomical studies.

The bark of trees is another botanical role model for highly energy dissipating construction materials. Hereby, the focus lies especially on tree species being native to regions with regularly occurring rockfall events. One example is the Giant Sequoia (*Sequoiadendron giganteum*), whose thick and highly structured bark (Fig. 4) protects the tree during forest fires and rockfall events. With its

Highlights

high energy absorption the bark of the Giant Sequoia protects the underlying cambium and prevents lethal injuries or subsequent infections caused by rockfall events [5].

The mechanical properties of the bark of Giant Sequoia are tested by impact tests. First test series proved an energy absorption of up to 90% being markedly higher compared to values found for trees occurring in regions without rockfall events.

Concluding, in all mentioned biological role models, a fibrous and multilayered hierarchical structuring of the underlying materials is the basis for a high amount of energy absorption and thus serves as inspiration for a transfer into technical concrete materials for building construction.

Fig.1: Cut open young fruit of the coconut palm (*Cocos nucifera*). Endosperm (white) and embryo are surrounded by the exocarp (Ex), the mesocarp (M) and the endocarp (En). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: Impact pendulum tests: Impact pendulum device with mounted endocarp sample (A); detailed view of A showing the mounted sample (B); Sketch of the original orientations of the samples within the coconut. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 3: Typical force-time curve of an impact pendulum test of the coconut endocarp showing the complex force pattern over time which reflects the hierarchical structuring of the endocarp. From [5]. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 4: The highly structured and thick bark protects the cambium of the Giant Sequoia during forest fires and from injuries during rockfall events. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Abb. 5: Free fall test rig used for impact tests of the Giant Sequoia tree bark (A), including a guided tube (1), an instrumented anvil (2) and a highspeed camera (3). (B) Typical force-time curve of an impact test with a sample of the Giant Sequoia tree bark at 3.8 J impact energy. From [5]. © Plant Biomechanics Group Freiburg

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

Marco Caliaro¹, Olga Speck¹

¹Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg und 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 A03

Im Laufe der Evolution haben Pflanzen und Tiere eine Vielzahl unterschiedlicher stabförmiger Strukturen entwickelt, die in der Lage sind ihre Steifigkeit und ihre Form zu verändern, ohne dass „klassische“ Gelenkungen und Scharniere vorhanden sind, wie sie heute typischerweise in den Ingenieurwissenschaften Verwendung finden.

Bei architektonischen Konzepten können derartige adaptive Systeme die technische Basis für Baukonstruktionen und Gebäudefassaden darstellen, die kontinuierlich auf sich ändernde physikalische Umweltbedingungen reagieren und somit das Potential für mehr Effizienz und Nachhaltigkeit in der Architektur erhöhen.

Im Rahmen dieses interdisziplinäre Forschungsprojekts arbeiten Botaniker der

Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg (PI: Dr. Olga Speck), Zoologen der Universität Tübingen (PI: Prof. Dr. Oliver Betz), sowie Ingenieure (PI: Prof. Dr. Jan Knippers) und Mathematiker (PI: Prof. Dr. Oliver Röhrle) der Universität Stuttgart zusammen. Die Kenntnisse über biologische Funktionsprinzipien, die zu adaptiven und gelenk- und scharnierfreien Mechanismen führen, eröffnen ein großes Potential für bionische Entwicklung neuartiger technischer Mechanismen mit systemischer und kontinuierlicher Aktuation.

Aus Sicht der Botaniker ist das Hauptziel des Projekts die Untersuchung der Mechanismen bei Pflanzen, die adaptive Steifigkeit und gelenkfreie Verbindungen zeigen, mit dem Ziel diese Mechanismen zu abstrahieren und auf neuartige bionische Systeme und Aktuatoren an Bauwerken zu übertragen. Vor dem Hintergrund, dass Pflanzen eine beachtliche Reihe von Mechanismen entwickelt haben, die adaptive Steifigkeit als Reaktion auf verschiedene externe Stimuli möglich machen, fokussieren wir uns in der ersten TRR-Förderphase auf wasserabhängiges adaptives Verhalten. Dies erfolgt zunächst im Rahmen eines Screeningprozesses krautiger Pflanzen, dann werden an den ausgewählten Modellpflanzen quantitative Analysen zur Funktionsmorphologie und Biomechanik bei unterschiedlichem relativem Wassergehalt der Versuchspflanzen durchgeführt und schließlich werden in einer Abstraktionsphase unterschiedlich detaillierte Finite Elemente Modelle erstellt.

Geeignete Modellpflanzen wurden auf Grundlage einer breit angelegten Literaturrecherche und eines Screeningprozesses basierend auf vorher festgelegten Kriterien ausgewählt: (i) krautige Pflanzenorgane, (ii) unverzweigte stab-

förmige Geometrie, (iii) adaptive Steifigkeit in Abhängigkeit vom jeweiligen Wassergehalt, (iv) aktive Aktuierung und (v) reversibler Adaptionsprozess. Als besonders erfolgsversprechend haben sich die Blütenstiele von *Gerbera jamesonii* Bolus ex Hooker f. 'Nuance' herausgestellt, bei denen jeder Blütenstiel eine einzelne, große und schwere Blume (Blütenstand = Pseudanthium) besitzt (Abb. 1).



Abb. 1: Testpflanzen (*Gerbera jamesonii* 'Nuance') im Gewächshaus des Botanischen Gartens Freiburg. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Morphologisch-anatomische Untersuchungen zeigen einen fast perfekt kreisrunden Querschnitt (5,8-7,5 mm Durchmesser, Durchmesser Verhältnis 0,89-1,11) und eine schwach ausgeprägte Verjüngung (Verjüngungsmodus 0,43-0,99) der Blütenstiele mit einer Gesamtlänge von ca. 45-55 cm. In Handschnitten sieht man eine zentripetale Anordnung von vier Gewebeschichten: (i) eine äußere Epidermis, (ii) ein peripheres Rindenparenchym mit unverholzten kleinen Zellen, (iii) ein geschlossener Ring aus verholztem Gewebe (Leitbündel und Sklerenchym) und (iv) ein innerer Ring aus unverholztem Parenchym mit größeren Zellen als die des Rindenparenchyms. Im mittleren Teil des Blütenstiels zeigt sich oft eine unregelmäßig geformte Markhöhle.

Highlights

Videoanalysen zeigen das wasserabhängige adaptive Verhalten der Blütenstiele im Detail. Nach Einstellung der Wasserzufuhr welken die Blütenstiele innerhalb von wenigen Tagen und biegen sich nahe der Blume (Pseudanthium). In dieser Biegezone zeigt der Blütenstiel deutlich ausgeprägte Ovalisierungen. Nach erneutem Gießen richten sich die Blütenstängel innerhalb einer Zeitspanne von einem Tag wieder in ihre Ausgangsposition auf. Dieser reversible Mechanismus und der verglichen mit dem langsamen Welken relativ schnellen Wiederherstellung der Turgeszenz ist gerade deshalb so interessant, weil zusätzlich zum Gewicht des Stängels auch das Gewicht der Blume angehoben werden muss.

Im Rahmen dieses Projekts werden an Pflanzen, die über mit mehr oder weniger Wasser verfügen, mechanische Tests (3-Punkt-Biegung) durchgeführt, um elastische Eigenschaften wie den Biege-Elastizitätsmodul sowie viskoelastische Eigenschaften wie die plastische Verformung und die Energiedissipation zu analysieren. Von jedem Blütenstängel wird der RWC (relative water content) berechnet (Abb. 2), welcher eine Aussage darüber erlaubt inwiefern der Wassergehalt und der damit assoziierte Turgor der Parenchymzellen [1] die mechanischen Eigenschaften beeinflusst.

Während der Übertragung von Funktionsprinzipien aus der Biologie auf technische Produkte (Bionik), ergeben sich neue Erkenntnisse, die wiederum zu einem tieferen Verständnis der Funktionsweise der biologischen Vorbilder beitragen (reverse Bionik). Dies erfordert wiederum eine genaue Untersuchung des biologischen Vorbilds, um eine kontinuierliche Verbesserung des techni-

schen Produkts durch den Ingenieur zu erreichen. Im Sinne einer heuristischen Spirale aus technischer Biologie (Funktionsmorphologie und Biomechanik des biologischen Vorbilds), bionischer Übertragung in die Technik und reverser Bionik, führt dieser Prozess zu einem erheblichen Wissenszuwachs sowohl des biologischen als auch des technischen Systems und insgesamt zu einer Verbesserung der bio-inspirierten technischen Lösung [2].



Abb. 2: Versuchsaufbau zur Messung und anschließenden Berechnung des relativen Wassergehalts (RWC) der Pflanzenproben. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Literatur

[1] Eastmond PJ & Ross JD (1997): Evidence that the induction of crassulacean acid metabolism by water stress in *Mesembryanthemum crystallinum* (L.) involves root signalling Plant, Cell and Environment 20: 1559-1565.

[2] VDI 6220 2012 Bionik: Konzeption und Strategie – Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfah-

ren/Produkten; Biomimetics: Conception and strategy – Differences between biomimetics and conventional methods/products VDI 6220 (Berlin: Beuth).

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

Marco Caliaro¹, Olga Speck¹

¹Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, 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 Centre 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Project A03

During evolution, plants and animals have evolved a variety of rod-like structures capable of adapting their stiffness and of achieving deformations without the need of classical joints or hinges common in engineering. In architectural concepts, such adaptable systems would provide the technical basis for the construction of building structures and facades that continuously react to changes of ambient physical conditions and would have the potential to enhance effectiveness and sustainability in architecture.

In the framework of this interdisciplinary research project botanists of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg (PI: Dr. Olga Speck) and zoologists of the University of Tübingen (PI: Prof. Dr. Oliver Betz) collaborate with engineers (PI: Prof. Dr. Jan Knippers), and mathematicians (PI: Prof. Dr. Oliver Röhrle) of the University of Stuttgart. Knowledge of the biological principles leading to such adaptive and

joint-free and hinge-less mechanisms offers huge potentials for the biomimetic development of novel technological mechanisms, providing systemic and continuous actuation.

Hence, from the botanists' viewpoint, the main aim of this project is to investigate mechanisms of plants exhibiting adaptive stiffness and joint-free connections and to abstract the functional principles in order to translate these mechanisms into novel biomimetic actuators for built structures. Bearing in mind that plants have evolved a remarkable range of mechanisms to create adaptive stiffness in reaction to several external stimuli, in the first CRC-period we focus on water-dependent adaptive stiffness. This is performed within the framework of a screening process of herbaceous plants followed by quantitative analyses of the functional morphology and biomechanics of plants with various relative water content and a subsequent abstraction via finite element models of variable detail.

Suitable plant models were selected on the basis of a broad based literature research and a screening process based on pre-defined criteria: (i) herbaceous plant organs, (ii) unbranched rod-like geometry, (iii) adaptive stiffness dependent on water content, (iv) an active actuation, and (v) a reversible adaptation process. Especially promising results could be found in pedicels of *Gerbera jamesonii* Bolus ex Hooker f. 'Nuance', whereby each of them bears a single, large and heavy flower head (pseudanthium) (Fig. 1).

Morphological-anatomical studies reveal an almost perfect circular cross-section (5.8-7.5 mm in diameter, aspect ratio 0.89-1.11) and a less pronounced taper

Highlights

(tapering mode 0.43-0.99) of the pedicels having a total length of approximately 45-55 cm. Hand-sections show a centripetal arrangement of four tissue layers: (i) an outer epidermis, (ii) a peripheral cortex parenchyma with unlignified small cells, (iii) a closed ring of lignified tissue (vascular bundles and sclerenchyma) and (iv) an inner ring of unlignified parenchyma with greater cells than the cortex cells. In the middle part of the pedicel often an irregularly shaped pith occurs.

Video analyses show the water-dependent adaptive behaviour of the pedicels in detail. After stopping the water supply the flower stalks wilt within a few days and bend close to the flower. In this bending zone the pedicel shows pronounced ovalisation. After re-watering the stalks totally return to the original position within a time span of one day. This reversible mechanism and the compared to the wilting phase relatively rapid turgidity process is even more interesting because of in addition to the pedicel's weight also the flower head's weight has to be lifted up.

Within these studies, water-dependent adaptive behaviour of pedicels which had more or less water availability will be investigated by using mechanical tests, e.g. three-point-bending tests for studying elastic properties like the bending elastic modulus and for analysing visco-elastic properties such as the degree of elasticity or energy dissipation. From each stalk the corresponding relative water content will be calculated (Fig. 2) in order to give evidence how the water availability, as well as the turgor pressure of the parenchyma cells associated therewith [1], influence the mechanical properties.

During the implementation of functional principles found in biological solutions into technical products (biomimetics), new findings arise that, in turn, contribute to a deeper insight into the functioning of the biological samples (reverse biomimetics). This requires a re-investigation of the biological samples to achieve a continuous improvement of the technical models of the engineers. In the sense of a heuristic spiral of technical biology (functional morphology and biomechanics of the biological concept generator), biomimetic transfer to technology, and reverse biomimetics, this process leads to a considerable gain in understanding of both the biological and the bio-inspired technical systems and to a refinement of the developed technical solutions [2].

Fig. 1: Test plants (*Gerbera jamesonii* 'Nuance') in the greenhouse of the Botanic Garden Freiburg. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: Test protocol to measure and subsequently calculate the relative water content of plant samples. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Kinematik planarer, gekrümmter und gewellter Pflanzenstrukturen als Ideengeber für bewegliche Strukturen in der Architektur

Anna Westermeier^{1,2}, Linnea Hesse^{1,2,3}, Simon Poppinga^{1,2,3} & Thomas Speck^{1,2,3}

¹Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg,

²Freiburger Institut für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT),

³Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)

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

Das Projekt A04 des DFG-Sonderforschungsbereichs TRR141 ist ein interdisziplinäres Forschungsvorhaben basierend auf der Kooperation zwischen Biologen der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg (PBG, PI: T. Speck) und Ingenieuren des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE, PI: J. Knippers) sowie dem Institut für Baustatik und Baudynamik (IBB, PI: M. Bischoff) und dem Institut für Textiltechnik, Faserbasierte Werkstoffe und Textilmaschinenbau (ITFT, PI: G. Gresser) der Universität Stuttgart.

In der heutigen Zeit sind die Anforderungen an moderne Gebäude und Gebäudehüllen vielfältig und anspruchsvoll. Energieeffizienz, Resilienz, Selbstregulierung, Nachhaltigkeit und Ästhetik stehen dabei im Mittelpunkt, was nach neuen Lösungen innerhalb der Baumechanik und der Architektur verlangt. Insbesondere Bauwerke mit ungewöhnlicher und innovativer Geometrie verlangen völlig neuartige Formen und Bewegungsprinzipien für Verschattungs- und Lüftungssysteme, die nicht nur robust, sondern auch (selbst-) adaptiv sein sol-

len. Ein biomimetischer Ansatz, dem die Untersuchung biologischer Ideengeber zugrunde liegt, könnte dabei neue strukturelle Lösungen liefern. Im Laufe der Evolution hat sich in der Natur eine Vielfalt an Formvariationen und Bewegungsstrukturen entwickelt, die im Rahmen des Projekts A04 insbesondere bei verschiedenen flächigen Pflanzenorganen untersucht werden.

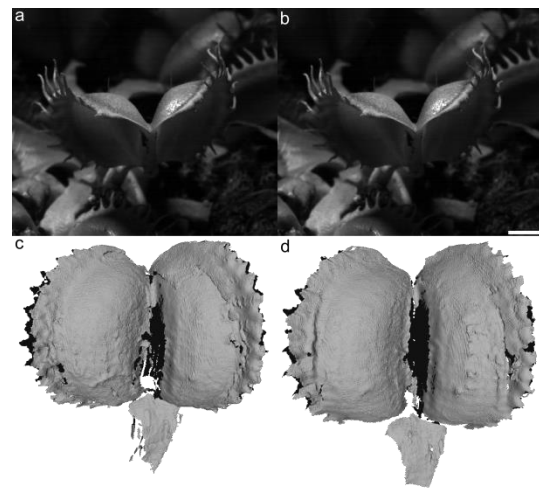


Abb. 1: Kulturvarietät „Angel Wings“ von *Dionaea muscipula*. Im geöffneten Zustand vor Reizung (a) und nach Reizung (b). Die Fallenhälften haben sich nur sehr schwach bewegt, ein Zuschnappen wird durch die außerordentlich starke Krümmung verhindert. 3D-Scan der Blatthälften vor Reizung (c) und nach Reizung der Falle (d). Maßstab 500 μm . © Plant Biomechanics Group Freiburg

Zentrales Ziel des Projekts A04 ist die Identifizierung und quantitative Analyse von pflanzlichen Bewegungssystemen und -prinzipien, um mögliche Lösungen für Anwendungen in der Architektur zu finden. Durch die Analyse, Abstraktion und technische Implementierung von Form-Struktur-Funktions-Zusammenhängen ausgewählter biologischer Ideengeber können zum einen in der Architektur vorhandene technische Systeme

optimiert, zum anderen aber auch vollkommen neuartige funktionelle Strukturen entwickelt werden.

Eines der biologischen Vorbilder für gelenkfreie Bewegungssysteme sind die Schnappfallen der Venusfliegenfalle (*Dionaea muscipula*). Beide Fallenhälften wechseln durch eine besonders schnelle Konfigurationsänderung zwischen einem konkaven und einem konvexen Zustand, was auch als „snap-buckling“ (zu Deutsch: Durchschlagen) bezeichnet wird [1]. Diese schnelle Bewegung ist durch das Freisetzen von in elastischer Deformation der Fallenhälften gespeicherter Energie möglich [2, 3]. Experimente sowie computergestützte Simulationen von natürlichen Fallen zeigten auf, dass sowohl die Dicke und der Durchmesser der Fallenhälften, als auch ihre Krümmung einen Einfluss auf die freigesetzte Energie während des „snap-bucklings“ haben [1].

Untersuchungen hinsichtlich der Fallenmorphologie und -anatomie an abweichenden, merkmalsstabilen Mutanten („Kultivaren“) der Venusfliegenfalle sollen klären, in wie weit die Geometrie der Schnappfallen die Art der Blattbewegung (d. h. das „snap-buckling“ oder stufenlose Krümmungsinversion) und die Geschwindigkeit der Bewegung tatsächlich beeinflusst. Die Kulturvarietät „Angel Wings“ der Venusfliegenfalle ist durch außergewöhnlich stark konkav gekrümmte Fallenhälften im Vergleich zum Wildtyp charakterisiert (Abb. 1). Das Venusfliegenfallen-Kultivar „Korean Melody Shark“ hingegen zeichnet sich durch eine besonders geringe konkave Krümmung der Fallenhälften aus (Abb. 2). 3D-Scans von geöffneten und geschlossenen, d.h. ausgelösten Fallen ermöglichen eine Digitalisierung und anschließende FE-Modellierung, die am

IBB und am ITKE durchgeführt werden (Abb. 1 und Abb. 2). Das Auslösen und Schließen der Falle wird hierbei mittels Highspeed-Aufnahmen aufgezeichnet, um die Konfigurationsänderung der Blatthälften zu jedem Zeitpunkt der Fangbewegung analysieren zu können.

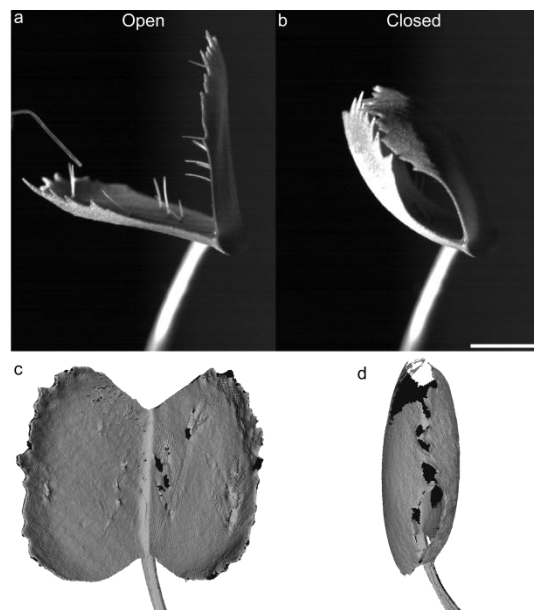


Abb. 2: Kulturvarietät „Korean Melody Shark“ von *Dionaea muscipula*. Im geöffneten Zustand vor Reizung (a) und im geschlossenen Zustand nach Reizung (b). 3D-Scan der Blatthälften vor Reizung (c) und nach Reizung der Falle (d). Maßstab 500 μm . © Plant Biomechanics Group Freiburg

Durch die Nutzung beider Methoden werden quantitative Rückschlüsse auf die Verformung der Blattflächen und auf deren Oberflächenstruktur möglich. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass die schwache Krümmung der Kulturvarietät „Korean Melody Shark“ zu einem stufenlosen Zuklappen der Blatthälften führt, wohingegen die überproportional stark konkav gekrümmten Fallenhälften von „Angel Wings“ nicht zuschnappen können. Die Energiefreisetzung durch das schlagartige Umschla-

gen scheint somit tatsächlich abhängig von der Fallengeometrie zu sein.

Durch die Analyse der verschiedenen Bewegungsabläufe unterschiedlicher Mutanten soll ein Formen-Katalog („morphospace“) der geometrisch möglichen Verformungen erstellt werden, der es ermöglicht, wichtige Parameter für das Bewegungsprinzip zu identifizieren. Daran anschließende biomechanische und anatomische Untersuchungen sollen diese Ergebnisse komplementieren, sodass die Zusammenhänge zwischen Form, Struktur und Funktion quantitative verstanden werden und als Grundlage für eine bio-inspirierte technische Umsetzung dienen können.

Literatur

[1] Y. Forterre, J. M. Skotheim, J. Dumais, L. Mahadevan, *Nature* 433, 421-425 (2005)

[2] S. Poppinga, T. Masselter & T. Speck, *Bioessays*, 35, 649-657 (2013)

[3] S. Poppinga, A. Metzger, O. Speck, T. Masselter & T. Speck, *Biologie in unserer Zeit / BIUZ*, 6/2013 (43), 2-11 (2013)

Kinematics of planar, curved and corrugated plant surfaces as concept generators for deployable systems in architecture

Anna Westermeier^{1,2}, Linnea Hesse^{1,2,3}, Simon Poppinga^{1,2,3} & Thomas Speck^{1,2,3}

¹Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg,

²Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT),

³Freiburg Materials Research Center (FMF)

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

The interdisciplinary research project A04 of the CRC 141 is based on the cooperation of biologists of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg (PBG, PI: Prof. Thomas Speck) and construction engineers and architects from the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE, PI: Prof. Jan Knippers), the Institute for Structural Mechanics (IBB, PI: Prof. Manfred Bischoff) and the Institute for Textile Engineering, Fibre-based Materials and Textile Machine Construction (ITFT, PI: Prof. Götz Gresser) of the University of Stuttgart.

Nowadays, functional requirements for buildings and especially building envelopes are as diverse as challenging. Energy-efficiency, self-regulation, resilience, sustainability and aesthetic are to be combined which demands for new solutions in constructional engineering and architecture. Especially for buildings with exceptional geometries, completely novel shapes and motion-principles for shading and ventilation systems are required, which do not only have to be robust but also should be (self-) adap-

Highlights

tive. A biomimetic approach using movements of plants as biological concept generators could help to develop new structural solutions to cope with these specific requirements. In the course of evolution, nature has evolved manifold structures that can serve as role models for the biomimetic optimization of building structures. A central aim of the project A04 is the identification, investigation und quantitative analysis of movement principles found in various planar plant organs. The analysis, abstraction and implementation of underlying form-structure-function-principles of selected biological role models can help to optimize existing technical constructions but also to establish novel designs.

The carnivorous plant *Dionaea muscipula* was chosen as suitable concept generator due to the effective hinge-less movement principles of the two leaf lobes which represent the snap-trap. The trap lobes perform an extraordinarily fast transition between concave and convex configurations which is called snap-buckling [1]. This very fast movement becomes possible by a release of energy stored in elastic deformation of the two leaf lobes [2, 3]. Experiments and computer-based simulations of the natural trap revealed that as well thickness and diameter as curvature of the trap lobes influence the energy-release during buckling [1].

To better understand how the geometry of the leaf lobes affects the mode of leaf movements (i.e. snap-buckling or smooth curvature inversion) as well as speed or power of buckling, investigations on cultivars of the Venus flytrap, i.e. morphologically divergent mutants, are conducted. The cultivar “Angel Wings” of the Venus flytrap is characterized by exceptional strongly concave

curved trap lobes in comparison to the wildtype (Fig. 1). By contrast, the Venus flytrap cultivar “Korean Melody Shark” stands out due to remarkably weak concave curvature of the two leaf lobes (Fig. 2).

3D-scans of open and closed, i.e. triggered traps allow for digitalization and subsequent finite-element-simulation of these traps which are conducted at the IBB and ITKE (Fig. 1, Fig. 2). Triggering and closure of a trap is recorded in these experiments by using a high-speed camera. By this, the change in configuration of the leaf lobes can be acquired at any time of the trapping motion.

Using these methods, quantitative conclusions can be drawn regarding deformation of the trap lobes and regarding variations of their surface structure. It could be shown, for example, that the weak curvature of the cultivar “Korean Melody Shark” leads to a smooth curvature inversion whereas the strongly concave trap lobes of “Angel Wings” were unable to snap. Therefore, it is likely that energy release due to buckling is highly dependent on the trap’s geometry.

By analysis of the different movement patterns of various Venus flytrap cultivars, it becomes possible to establish a morphospace of geometrically possible deformations and to identify parameters important for this motion principle. Subsequently, biomechanical and anatomical studies should complement the results in order to understand quantitatively the relation between form, structure and function. These results will serve as basis for bio-inspired technical implementations.

Fig. 1: Cultivar “Angel Wing” of *Dionaea muscipula*. Open state before triggering (a) and after triggering (b). Snap buckling is inhibited by the strongly concave curved trap lobes. 3D-scan of the leaf lobes before triggering (c) and after triggering of the trap (d). Scale 500 μm . © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: Cultivar “Korean Melody Shark” of *Dionaea muscipula*. Open state before triggering (a) and closed state after triggering (b). 3D-scan of the leaf lobes before triggering (c) and after triggering of the trap (d). Scale 500 μm . © Plant Biomechanics Group Freiburg

Die Verzweigung von *Schefflera arboricola* als Ideengeber für die Optimierung lastadaptierter faserverstärkter Kunststoffrohre in verzweigten Tragwerkstrukturen

K. Bunk^{1,2}, L. Born³, G. Gresser³,
F. Jonas⁴, J. Knippers⁴, T. Speck^{1,2},
T. Masselter^{1,2}

¹Plant Biomechanics Group Freiburg (PBG) & Botanischer Garten, Universität Freiburg, ²Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT), ³Institut für Textiltechnik, Faserbasierte Werkstoffe und Textilmaschinenbau (ITFT), Universität Stuttgart, ⁴Institut 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 A06

Das Projekt A06 des SFB-TRR141 ist eine Kooperation zwischen der ‚Plant Biomechanics Group Freiburg‘ (PBG, Universität Freiburg), dem Institut für Textiltechnik, Faserbasierte Werkstoffe und Textilmaschinenbau (ITFT, Universität Stuttgart) und dem Institut für Trag-

konstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE, Universität Stuttgart). Die enge Zusammenarbeit von Experten der Fachgebiete Botanik und Biomechanik sowie Textil- und Bauingenieurwesen ermöglicht die Untersuchung ausgewählter biologischer Ideengeber, deren Wirkprinzipien in nachfolgenden Schritten abstrahiert und in die Bautechnik übertragen werden.



Abb. 1: *Schefflera arboricola*, a) Verzweigung mit parenchymatischer Rinde, © Plant Biomechanics Group Universität Freiburg, b) entrindete Verzweigung, Maßstab 1 cm. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Zentrales Ziel des Projekts A06 ist die Analyse pflanzlicher Verzweigungen mit besonderem Schwerpunkt auf der Anordnung lastadaptierter Fasern im Übergangsbereich von Hauptstamm zu Seitenästen. Basierend auf diesen Ergebnissen sollen Flechtstrukturen sowie die technische Fertigung faserverstärkter Kunststoffrohre (FVK-Rohre) aus Glas- oder Karbonfasern, welche Zug-, Druck- und Torsionskräfte aufnehmen, strukturell und mechanisch verbessert werden [1,2]. Die biomimetisch optimierten FVK-Rohre sollen sowohl als tragende Hüllstrukturen sowie als Schalung verzweigter Baustrukturen aus Beton dienen. Deshalb ist die lückenlose Verbindung zu dem Betonkern, welcher im Erhär-

Highlights

tungsprozess schwindet, von besonderem Interesse.

Als erster biologischer Ideengeber wurde die Verzweigung von *Schefflera arboricola*, einer kleinen baumförmigen Pflanze aus der Familie der Araliaceae, ausgewählt. Diese Pflanze zeichnet sich durch eine außergewöhnliche ‚fingerförmige‘ Morphologie im Verzweigungsbereich aus, bei welcher die lignifizierten Leitbündel als einzelne verholzte Segmente vom Haupt- in die Seitentriebe verlaufen [3] (Abb.1).

Dieser ungewöhnliche Verzweigungstyp lässt eine lastadaptierte Faseranordnung im Verzweigungsbereich vermuten, wodurch eine hohe mechanische und vaskuläre Anbindung der Seitenäste gewährleistet ist. Um den Leitbündelverlauf im Knotenbereich vollständig nachvollziehen zu können, wurden serielle Dünnschnitte durch Verzweigungen von *Schefflera arboricola* angefertigt. Mit Hilfe von komplexen Bildbearbeitungsmethoden und daran anschließender 3D-Rekonstruktion der Schnittserien konnte die Anordnung der Leitbündel im Verzweigungsbereich dreidimensional dargestellt werden. Die Ergebnisse belegen eine breite Umgreifung der Hauptachse durch die fingerförmigen Leitbündel, welche einzeln aus dem Stamm hervortreten und nach Eintritt in die Seitenachse wieder distal zusammengeführt werden (Abb. 2a). Als zusätzliche bildgebende Methode werden μ CT Scans des Holzkörpers einer *Schefflera*-Verzweigung angefertigt. Diese Methode ermöglicht die lückenlose und hochauflösende Darstellung des Verlaufs der lignifizierten Leitbündel sowie die Modellierung der Oberflächenmorphologie im Bereich der Verzweigung (Abb. 2b). Das daraus resultierende Oberflächennetz wird für Finite-Elemente Simulationen

genutzt, welche von den Projektpartnern des Bauingenieurwesens am ITKE an der Universität Stuttgart durchgeführt werden. Diese Simulationen sollen Aufschluss über die Verformungen und Spannungsverteilung der untersuchten Struktur geben. Um realistische Materialparameter in diese Simulationen einzuspeisen und Verformungseigenschaften der *Schefflera* Verzweigung unter Last analysieren zu können, werden biomechanische Tests an verzweigten Holzkörpern von *Schefflera* durchgeführt.

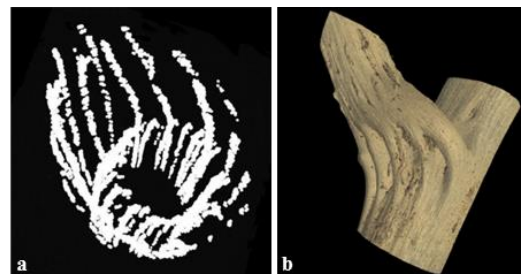


Abb. 2: Rekonstruktionen der Verzweigung von *Schefflera arboricola*, a) innerer Leitbündelverlaufs einer jungen Verzweigung, rekonstruiert aus seriellen mikroskopischen Dünnschnitten. © Plant Biomechanics Group Freiburg, b) Geometrierekonstruktion basierend auf einem μ CT Scan. © ITFT Universität Stuttgart

In enger Zusammenarbeit mit den Textil- und Bauingenieuren des ITFT und des ITKE der Universität Stuttgart wird der Leitbündelverlauf in der Verzweigungsregion von *Schefflera* für eine Übertragung in technische Materialien auf seine für die Funktion wesentlichen Aspekte hin vereinfacht und die wesentlichen Wirkprinzipien werden extrahiert. Diese dienen im nächsten Schritt als Ideengeber für die Optimierung von Flechtstrukturen in verzweigten FVK-Rohren aus Glas- bzw. Karbonfasern. Wesentliche Merkmale hierfür sind die Austrittspunk-

te der Fasern aus der Haupt- in die Seitenachse, deren dreidimensionaler Verlauf durch die Verzweigungsregion sowie die Position und Art der Zusammenführung nach der Verzweigung im Seitenast. Die Entwicklung einer speziellen Stehfadenhalterung für eine Radialflechtmaschine, welche eine Einzelfadenspannungssteuerung ermöglicht, soll die Herstellung von optimierten bioinspirierten verzweigten Faserverbundstrukturen ermöglichen.

Zusätzlich zur Analyse und Abstraktion biologischer Ideengeber werden von den Projektpartnern des Textil- und Bauingenieurwesens grundlegende Materialprüfungen durchgeführt, um eine realistische Übertragung der identifizierten Konzepte pflanzlicher Verzweigungen in die Bautechnik zu gewährleisten. Diese Tests beinhalten die mechanische Prüfung verschiedener Flechtstrukturen und werden stufenweise mit zunehmender Komplexität der bioinspirierten technischen Strukturen durchgeführt, beginnend mit der Prüfung zweidimensionaler Geflechte in Verbindung mit Beton, bevor rohrförmige und verzweigte Strukturen betrachtet werden (Abb. 3a). Im Zuge dessen soll auch die Verbindung der faserverstärkten Kunststoffhülle zum Betonkern optimiert werden, da diese Verbindung von zentraler Bedeutung für die Kraftübertragung auf die lastadaptierte, zugkraftaufnehmende Mantelstruktur ist. Ein verbesserter Zusammenhalt kann beispielsweise durch die Anwendung des 'Tuftings' im Flechtprozess erreicht werden, bei welchem abstehende Stiften der geflochtenen Kunststoffhülle eine enge Verbindung mit dem Betonkern eingehen (Abb. 3b).

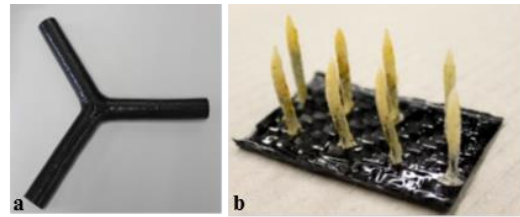


Abb. 3: Bioinspirierte Strukturen aus Kohlenfaser, a) trichotome, geflochtene Verzweigung. © ITFT Universität Stuttgart, b) imprägniertes Karbongewebe mit getufteten Stiften. © ITFT Universität Stuttgart

Die Analyse des biologischen Ideengebers *Schefflera* sowie die Abstraktion und Implementierung der bioinspirierten Konstruktionsprinzipien wird im laufenden Projekt fortgesetzt und auf verwandte Arten innerhalb der Araliaceae ausgeweitet, welche eine ähnliche Verzweigungsmorphologie wie *Schefflera* aufweisen. Zusätzlich dazu wird ein Formenkatalog unterschiedlicher pflanzlicher Verzweigungen zusammengestellt, welcher unter anderem Arten der Gattungen *Edgeworthia*, *Semiarundinaria* und *Angelica* beinhaltet wird. Durch die Visualisierung und Analyse verschiedener Verzweigungsmorphologien mit gleichen Methoden soll die Vergleichbarkeit sowie eine Klassifizierung der Strukturen für die Anwendung in Architektur und Bauingenieurwesen gewährleistet werden.

Literatur

- [1] J. Knippers & M. Gabler. Stahlbau Kalender 2007, Ernst & Sohn, Berlin (2007)
- [2] L. Müller, M. Milwich, A. Gruhl, H. Böhm, M. Gude, T. Haushahn, T. Masselter, H. Schwager, C. Neinhuis & T. Speck, Tech. Text. 56, 231-235 (2013)
- [3] P.B. Tomlinson, J.B. Fisher, F. Hallé, R. Villalobos, American Journal of Botany, 92(11), 1765-1773 (2005)

The ramification of *Schefflera arboricola* as concept generator for the optimization of load-adapted fibre-reinforced polymer tubes in branched building structures

K. Bunk^{1,2}, L. Born³, G. Gresser³,
F. Jonas⁴, J. Knippers⁴, T. Speck^{1,2},
T. Masselter^{1,2}

¹Plant Biomechanics Group Freiburg (PBG) & Botanic Garden, University of Freiburg,

²Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT),

³Institute for Textile Technology, Fiber-Based Materials and Textile Machinery (ITFT), University of Stuttgart, ⁴Institute 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 A06

The project A06 of the SFB-TRR 141 is a cooperation between the Plant Biomechanics Group Freiburg (PBG, University of Freiburg), the Institute for Textile Technology, Fiber-Based Materials and Textile Machinery (ITFT, University of Stuttgart) and the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE, University of Stuttgart). The close cooperation between experts of botany and biomechanics as well as of textile- and civil engineering enables the investigation of selected biological concept generators for the subsequent abstraction and technical implementation of functional principles in constructional engineering.

Central aim of the project A06 is the analysis of plant branchings, focusing on the load-adapted fibre orientation in the transition region between main stem and branches. Based on this assessment,

the braiding structures as well as the manufacturing techniques of fibre reinforced polymer (FRP) tubes made of glass- or carbon fibres, bearing tension-compression and torsion forces, will be improved structurally and mechanically [1,2]. These biomimetically optimized FRP tubes are intended to form a load-bearing supporting mantle as well as a casting mould for branched building structures out of concrete. In order to meet these demands, the close connection between the plastic hull and the concrete core which shrinks during the hardening process is of particular importance.

As a first biological concept generator, the Araliaceae species *Schefflera arboricola*, a small arborescent plant, has been selected. It exhibits a conspicuous, ‘finger-like’ branching morphology of individual woody segments, representing highly lignified vascular bundles running from the main stem into the side branches [3] (Fig. 1). This unusual branching mode implies a load-adapted arrangement of lignified tissue in the branch-stem attachment region which ensures a broad vascular and mechanical integration of the side branch. To fully comprehend the course of the vascular bundles in the nodal region, serial thin-sectioning through the ramifications of *Schefflera* has been performed. With the help of post-processing and subsequent 3D reconstruction of the microscopic image stacks the arrangement of the vascular bundles in the branching region could be three-dimensionally described. The result reveals a broad encompassing of the main axis by the vascular strands, which are each emerging independently from the main stem and merge distally after entering the side branch (Fig. 2a). As a supplementary

imaging method, μ CT scanning of the woody tissue of a fully developed *Schefflera* ramification has been conducted. This method allows for gapless tracking of the course of lignified fibre bundles in high-resolution and additionally modelling the surface morphology in the branching region (Fig. 2b). The resulting surface mesh is used for FEM simulations, conducted by the project partners from civil engineering at the ITKE of the University of Stuttgart. These simulations shall give information about deformation and stress distribution of the investigated structure. To enter viable material parameters in the simulation process and analyse realistic deformation properties of the branch-stem-attachment region under load, biomechanical test will be performed on the branched woody structure of *Schefflera* ramifications.

Together with textile- and civil engineers from the ITFT and ITKE of the University of Stuttgart, the vascular bundle arrangement in the branching region of *Schefflera* will be simplified for a transfer in technical materials to its crucial aspects for functioning and the main working principles will be extracted. In a next step, those serve as concept generators for optimizing the braiding process of glass- or carbon fibres in branched FRP tubes. Key features for this are the position of fibre diversion from the main axis in the branch, their three-dimensional course through the ramification and the position and manner of merging distal to the nodal region in the side branch. The development of a specialized braiding setup, enabling the control of single fibre tension, shall allow for the manufacturing of optimized bio-inspired branched fibre-reinforced compound structures.

In addition to the analysis and abstraction of the biological concept generators, basic material tests are performed by the project partners from textile- and civil engineering to enable a realistic implementation of the identified concepts from botanical branchings in construction technology. The material tests involve mechanical testing of different braided structures and are conducted with incremental complexity of the bio-inspired technical structure, starting with planar structures attached to concrete, before subsequently dealing with tubular shapes and branched structures (Fig. 3a). In this context also the connection between the FRP tube and the concrete is optimized, as this connection is of central importance to guarantee force transmission to the tension-load-bearing fibrous mantle. An improved bonding can be ensured via applying the manufacturing process of 'Tufting', establishing a tight connection between the braided FRP mantle and the concrete via off-standing pins (Fig. 3b).

The analysis of the biological concept generator *Schefflera* as well as the abstraction and implementation of the bio-inspired constructional principles will be pursued in the on-going project and will be extended to related Araliaceae genera, displaying a similar branching morphology as *Schefflera*. In addition to that, a shape catalogue of diverse plant ramifications involving for example species of the genera *Edgeworthia*, *Semiarundinaria* or *Angelica* will be assembled. Via the imaging and analysis of different branching morphologies with the same methods, the comparison and classification of these structures is to be ensured for the implementation in architecture and civil engineering.

Fig. 1: *Schefflera arboricola*, a) ramification with parenchymatous cortex. © Plant Biomechanics Group Freiburg, b) decorticated ramification, scale bar 1 cm. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: Reconstructions of the ramification of *Schefflera arboricola*, a) inner course of vascular bundles in a young ramification, reconstructed from microscopic serial thin sections. © Plant Biomechanics Group Freiburg, b) geometrical reconstruction based on a μ CT scan. © ITFT University of Stuttgart

Fig. 3: Bio-inspired structures made of carbon fibres, a) trichotomous braided branch. © ITFT University of Stuttgart, b) impregnated carbon fabric with tufted pins. © ITFT University of Stuttgart

Kontinuierliche Gebäudehüllen- extrusion auf der Basis der Schneckenschalenbildung

V. Koldeisz^{1,2}, S.Chandran²,
G. Reiter^{1,2,3}, R. Reiter^{1,2}

¹Freiburger Materialforschungszentrum (FMF), ²Experimentelle Polymer Physik, Freiburg, ³Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB-Transregio 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ – Projekt A08

Basierend auf sehr komplexen Mechanismen der Aushärtung und Formung von Kompositmaterialien aus organischen und anorganischen Komponenten können Schnecken eine Vielfalt an Formen und Oberflächenmorphologien ihrer Schalen realisieren. Inspiriert von diesen Prinzipien und Prozessen die man insbesondere bei der Schalenbildung von Landschnecken antrifft, zielt dieses interdisziplinäre Forschungsprojekt darauf ab, einen Herstellungsprozess für architektonische Gebäudehüllen zu entwi-

ckeln, der auf der additiven Schichtung von polymeren Kompositmaterialien beruht.

Im Fokus steht dabei die Herstellung komplexer Strukturen für Gebäudehüllen bei welcher Funktionalität durch hierarchisch aufgebaute Oberflächenstrukturierung von polymeren Materialien erzielt wird. In diesem Zusammenhang dienen Landschnecken als hervorragender biologischer Ideengeber, da sie kontinuierlich aus einer räumlich begrenzten Drüse (Periostrakumgrube, siehe Abb. 1) unterschiedliche Materialeinheiten zur Schalenbildung absondern. Der Extrusionsprozess des Periostrakums hat gewisse Ähnlichkeiten mit Prozessen in der 3D Drucktechnik. Hier wird das Material aus einer Anordnung von Druckköpfen extrudiert, deren räumliche und zeitliche Trajektorien computergesteuert werden. Die ersten Untersuchungen des Projektes konzentrieren sich auf die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des Periostrakums.

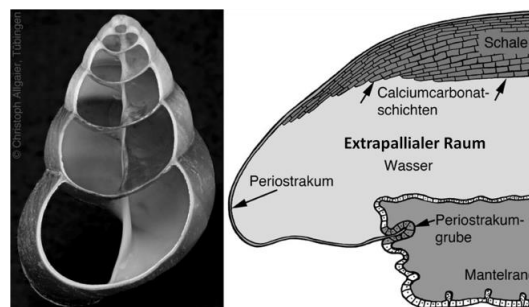


Abb. 1: Querschnitt durch eine Schnecken-schale (links). Die Schale ist an den Schneckenkörper an der Öffnung links unten angeheftet. An der Unterkante dieser Öffnung wird das Schalenwachstum initiiert. Die Zeichnung rechts illustriert die Produktion von Periostrakum, welche in der Periostrakum Grube beginnt. Im Laufe der Zeit reift es und wird schließlich mit Calciumcarbonat Schichten mineralisiert. © C. Allgaier, ergänzt

Periostrakum ist eine polymerähnliche, dünne, organische Schicht gebildet von Periostrakum-Einheiten, welche in das Lumen der Drüse sezerniert wurden. Diese dispergierten Einheiten müssen zunächst ausgerichtet und eventuell vernetzt werden um eine Periostrakumplatte zu bilden, welche als Trägermatrix für die Anordnung weiterer organischer Schichten dient.

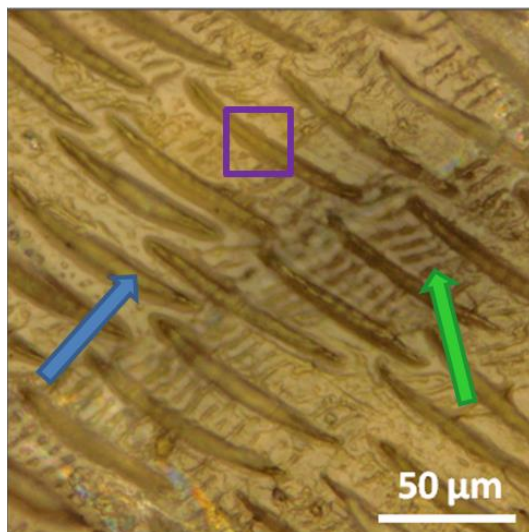


Abb. 2: Lichtmikroskopische Aufnahme von einem Stück Periostrakum einer Landschnecken Spezies. Eine deutliche periodische Mikrostruktur mit länglichen um etwa 10 μm erhöhten Strukturen tritt auf. Bildgröße: 286 μm x 212 μm © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Das ausgereifte Periostrakum besteht aus mindestens drei Schichten unterschiedlicher Dichte und dient letztendlich als Substrat für die Kristallisation von Calciumcarbonat, welche im extrapallialen Raum stattfindet (Abb. 1). Nachdem die Biomineralisierung an der inneren, dem extrapallialen Raum zugewendeten Seite stattgefunden hat, befindet sich Periostrakum als äußere Schutzschicht auf der Schale. Es muss daher in diesem Stadium der Entwicklung hinreichende Elastizität aufweisen um diese

Krümmung zu gewährleisten. Periostrakum wird kontinuierlich produziert, wodurch ein fortlaufendes Wachstum der Schale gewährleistet wird.

Abbildung 2 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme eines Stücks Periostrakum, welches unser Projektpartner Dr. Christoph Allgaier (Universität Tübingen, Paläontologie) einer Landschnecke entnommen hat. Die Aufnahme zeigt deutlich, dass eine periodische Mikrostruktur vorhanden ist, die wir derzeit mittels AFM untersuchen. Erste Ergebnisse liefern deutliche Hinweise auf unterschiedliche mechanische Eigenschaften in den optisch unterscheidbaren Regionen. Die länglichen Bereiche (blauer Pfeil) welche ca. 70 μm lang sind und etwa 10 μm aus der Ebene heraus ragen, zeigen größere Härte als die mit Fibrillen durchzogenen tieferliegenden Bereiche (grüner Pfeil).

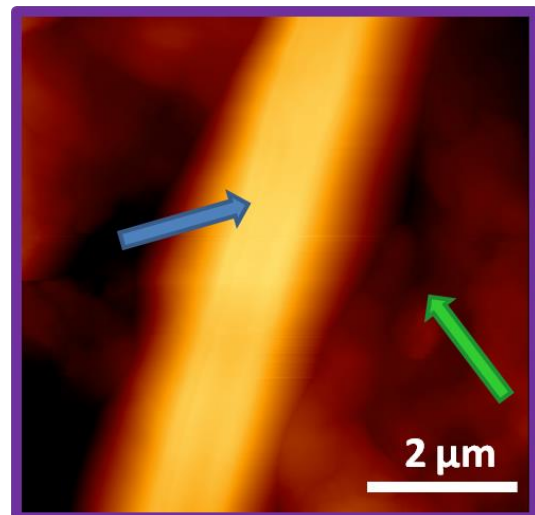


Abb. 3 zeigt eine AFM Messung im lila umrahmten Bereich der Lichtmikroskopie. Die mechanischen Eigenschaften wurden auf der Oberfläche einer erhöhten länglichen Struktur und dem darunter liegenden organischen Film untersucht. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Die gezeigte Struktur legt die Hypothese nahe, dass Periostrakum entlang der länglichen Strukturen eine höhere Biegesteifigkeit besitzt als in Richtung der fibrillären Strukturen die orthogonal dazu stehen. Abbildung 3 zeigt erste AFM Untersuchungen an diesen beiden strukturellen Elementen der lichtmikroskopischen Aufnahme (violett umrahmter Bereiche) welche diese Hypothese bekräftigen. An der Oberfläche der länglichen Struktur (blauer Pfeil) ist das Material deutlich härter als der tieferliegende organische Film (grüner Pfeil).

Basierend auf diesen Ergebnissen werden polymere Komponenten mittels Selbst Assemblierung an der Wasser Luft Grenzfläche eines Langmuir Troges zunächst lateral strukturiert. Poly- γ -benzyl-L-glutamat (PBLG) stellt hierfür ein biologisch relevantes und gleichzeitig ein morphologisch kontrollierbares System dar [3].

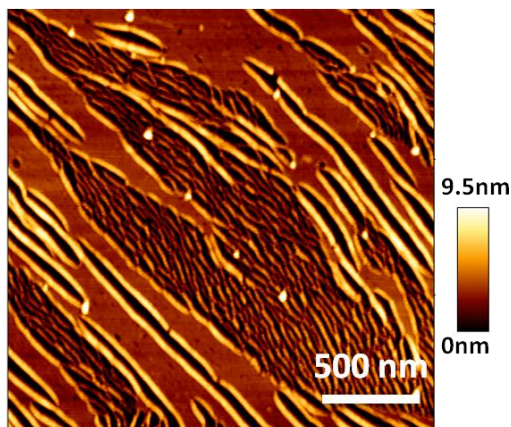


Abb. 4.: AFM Höhenbild einer Poly- γ -benzyl-L-glutamat Monolage aus einer Mischung von kurz- und langkettigen Molekülen. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Abbildung 4 zeigt ein AFM Höhenbild einer Monolage einer Mischung von lang- und kurzkettigen (PBLG) welches in α -helicaler Konformation vorliegt. Man

erkennt deutlich festanaloge Bereiche die leicht aus einer fibrillären Matrix herausragen. Mittels Langmuir Schäfer Technik können solche Monolagen horizontal übereinander gestapelt werden. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, dass in einem solchen Stapel innerhalb der fibrillären Bereiche eine Koaleszenz der Fibrillen sowohl lateral als auch in vertikaler Richtung stattfindet. Im Weiteren soll untersucht werden, ob sich auf diese Weise kontrollierte Strukturen in vertikaler Richtung aufbauen lassen. Solche strukturierten Multilagen sollten unterschiedliche Biegesteifigkeit in fibrillären und festanalogen Regionen aufweisen und könnten im Weiteren als Template im 3D Druck verwendet werden.

Literatur

- [1] K. Simkiss, Molluscan Skin: The Mollusca, Vol.2, p.11-33, Academic Press, New York (1988)
- [2] A.S. Saleuddin and H.P. Petit: The mode of formation and structure of the periostracum: The Mollusca, Vol.4, p.199-235, Academic Press, New York (1983)
- [3] S. Chandran, S. Dold, A. Buvignier, K. Krannig, H. Schlaad, G. Reiter and R. Reiter, Langmuir (2015), 31, 6426-6435

Continuous fused deposition modelling of architectural envelopes based on the cell formation of molluscs

V. Koldeisz^{1,2}, S. Chandran²,
G. Reiter^{1,2,3} & R. Reiter^{1,2}

¹Freiburg Materials Research Center,

²Experimental Polymer Physics, Freiburg,

³Freiburg Centre for Interactive Materials and Bio-inspired Technologies (FIT)

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

Based on highly complex mechanisms of shaping and hardening of composite materials with both organic and inorganic layers, snails are capable of constructing a wide range of shell forms and surface textures.

Inspired by these principles and processes involved in the continuous formation of the shell of land snails, this interdisciplinary research project aims at developing a manufacturing process based on the adaptive formation of a layered assembly for the construction of architectural envelope structures. The main objective is the additive manufacturing of complex architectural constructions where functionality is added through microscopically textured surfaces built from hierarchically ordered polymeric composite materials. In this context, land snails represent a biological role model of particular interest because they continuously produce material for constructing their shell by extrusion within a single groove of tissue (the periostracal groove shown in figure 1). This extrusion process has some resemblance with technological 3D printing processes where material supply is ac-

complished through an array of computer-operated nozzles.

The initial studies of the project focus on the investigation of the mechanical properties of periostracum. Periostracum is a polymer-like, thin organic film built from periostracal units secreted from the epithelial cells of the groove and extruded into the lumen of the gland. These dispersed units need to be aligned and eventually cross linked in order to form a periostracal sheet which serves as a supporting matrix for the deposition of further organic layers. The mature periostracum consists of leastwise three layers of distinguishable densities and serves as a substrate for crystallisation of calcium carbonate which takes place at the inner side which is directed towards the extrapallial space (see Fig. 1). After this biomineralisation process periostracum is on the outside of the shell as a protective layer. In order to allow for such a bending, the composite layer must provide appropriate flexibility. Periostracum is produced in a continuous manner assuring permanent growth of the shell of the snail.

Figure 2 shows an optical micrograph of a small piece of periostracum which was extracted from a land snail by our project partner, Dr. Christoph Allgaier (University of Tübingen, Palaeontology). The image clearly shows a periodic microstructure which we are presently investigating by means of AFM. First results suggest differences in mechanical properties for the optically distinguishable regions. The elongated structures (blue arrow) which have a length of about 70µm and protrude out of plain, show increased hardness with respect to the underlying film with fibrillar structures (green arrow).

Based on the presented periodic microstructure we suppose that the bending rigidity along the elongated structures is higher than in the orthogonal direction along the axis of the fibrils. Figure 3 shows preliminary AFM measurements on these two structural elements identified by optical microscopy (violet frame). On top of the elongated structure (blue arrow) the material appears considerably harder than in the underlying, fibril containing regions (green arrow).

Based on these findings appropriate polymeric components are brought into the air water interface of a Langmuir trough to obtain laterally structured thin films by means of self-assembly. Poly- γ -benzyl-L-glutamat (PBLG) represents a biological relevant system with controllable morphology [3]. Figure 4 shows an AFM height image of a monolayer of a mixture of short and long chain PBLG which adopts helical conformation. Solid-like regions are imbedded in a fibrillar matrix. The Langmuir Schäfer technique allows for horizontal stacking of such monolayers. Preliminary results reveal coalescence of the fibrils in those stacks in both the lateral and also in the vertical direction. In the following we will investigate if this method allows for structural control in the vertical direction. Multilayers obtained in this way should exhibit differences in bending rigidity in the structural different regions. Furthermore they could serve as templates in 3D printing processes.

Fig. 1: Cross section through a snail shell (left). The shell is attached to the body of the animal at the opening on the lower left which appears black. At the periphery of the shell - animal contact the shell growth is initiated. The cartoon on the right side shows the production of periostracum which is initiated within the periostracal groove. Periostracum matures during the growth and gets min-

eralized with layers of calcium carbonate. © C. Allgaier, edited

Fig. 2: Optical microscopic image of a piece of periostracum, peeled from the shell of a land snail. A periodic microstructure with elongated structures of an elevation of about $10\ \mu\text{m}$ is revealed. Image size: $286\ \mu\text{m} \times 212\ \mu\text{m}$. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Fig. 3: An AFM micrograph of the violet-rimmed region of the optical image is shown. Mechanical properties were investigated on top of the elongated structure and the underlying organic film. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Fig. 4: AFM height image of a monolayer of a mixture of short and long chain Poly- γ -benzyl-L-glutamat. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

Wechselwirkung von Zellen mit nano- und mikrostrukturierten Oberflächen

Melanie Eichhorn¹, Oswald Prucker¹,
Karine Anselme², Jürgen Rühle¹

¹IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, ²Institut de Science des Matériaux de Mulhouse, CNRS UMR7361

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – IRTG Soft Matter Science

Diese Studie ist ein interdisziplinäres Projekt zwischen den Biologen der Universität Mulhouse und Forschern des Instituts für Mikrosystemtechnik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Die Verwendung künstlicher Materialien für medizinische Anwendungen macht es notwendig, die Adhäsion von Zellen an Oberflächen zu verstehen und zu kontrollieren.

Es sind im Wesentlichen drei Faktoren, die die Stärke der Wechselwirkung von Zellen (und manchmal auch Zellorganel-

len) mit Oberflächen beeinflussen: Die Topographie bzw. Rauigkeit, die Oberflächenchemie und die mechanischen Eigenschaften (Abb. 1) der eingesetzten Materialien.

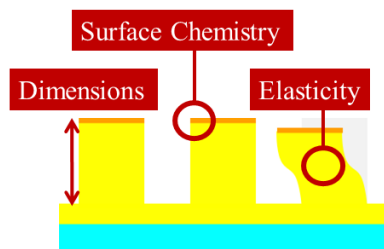


Abb. 1: Drei Oberflächenparameter kontrollieren die Wechselwirkung biologischer Umgebungen mit mikrostrukturierten Oberflächen © CPI, IMTEK, Uni Freiburg.

Alle drei Faktoren spielen eine wichtige Rolle in der Wechselwirkung von Oberflächen mit der extrazellulären Matrix und der Zellmembran.

Ein interessanter Fall ist das Verhalten der Knochenkrebszellen SaOs-2 cells (Sarcoma osteogenic), deren Zellkern sich stark verformt, wenn sie auf mikrostrukturierten Oberflächen angesiedelt werden [1-3]. SaOs-2 ist eine permanente humane Zelllinie, die von einem Knochenkrebs abstammt und als Modell für stark deformierbare Zellen dient.

Wir haben nun mikrostrukturierte Oberflächen in der Form von Mikrosäulenfeldern definierter Größe, Form und Abstandes generiert [4]. Die Größen und Säulenabstände variierten zwischen 4 und 9 μm . Diese Abstände sind deutlich kleiner als die Dimensionen der untersuchten Zellen. Die Höhe der Säulen wurde auf 10 μm festgesetzt (Abb. 2). Die Säulen bestanden aus einem photochemisch vernetzten gummiartigen Material (Poly-(n-Butylacrylat), PnBA)

Darüber hinaus haben wir Wege entwickelt um die Oberflächen der Felder zellfreundliche oder zellabweisend zu gestalten. Dies ist orts aufgelöst möglich: Die Pfostendeckflächen können anders gestaltet werden, als die „Täler“ dazwischen. Dies wurde durch eine Kombination des Mikrokontaktstempels (zur Erzeugung der Mikrostrukturen) mit der Abscheidung von Tinten und deren photochemischen Verankerung an den Oberflächen erreicht. Hier wurde ein neuartiger Prozess für die photochemisch induzierte C,H-Insertionsvernetzung angewandt, der eine kovalente Verankerung der Polymeren auf dem ebenso polymeren Substrat ermöglicht.

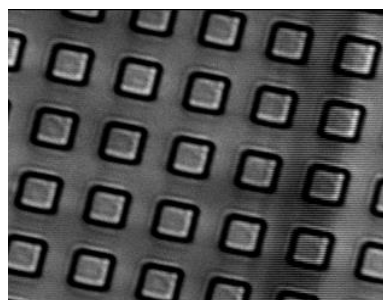


Abb. 2: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Mikrosäulenfeldes aus PnBA. © CPI, IMTEK, Uni Freiburg.

Ein sehr interessantes Ergebnis wurde für Säulenfelder gefunden, bei denen die Deckflächen der Säulen mit einem zellabweisenden Hydrogel [5] beschichtet waren, wohingegen die Säulenseiten und die Flächen zwischen den Säulen zellattraktiv blieben.

Abbildung 3 zeigt Zellen, die auf diese Oberflächen gebracht wurden. Die Deckflächen der Säulen sind mit einem roten Fluoreszenzfarbstoff markiert und die Zellkerne der Zellen sind in blau angefärbt.

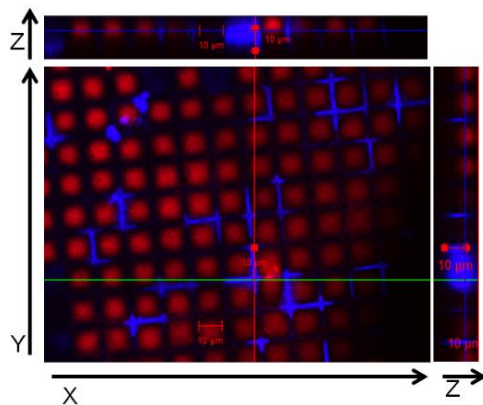


Abb. 3: SaOs-2 Knochenkrebszellen (fixiert) auf einer Säulefeldoberflächen (11 x 11 μm , Höhe 10 μm , Abstand 3 μm). Die Zellkerne sind blau markiert, die zellabweisenden Deckflächen der Säulen sind rot. © CPI, IMTEK, Uni Freiburg.

Die zellabweisende Beschichtung der Säulendeckflächen verhindert nicht die Zellbesiedlung der Oberflächen als Ganzes, aber reduziert die Zelldichte in starker Weise im Vergleich zu der Dichte, die auf vollständig zellattraktiven Oberflächen erreicht wird. In vielen Fällen sind die Zellkerne zwischen den Säulen stark deformiert. Dies geschieht je nach Oberflächen ab bestimmten Architekturparametern, die sich von den rein zellfreundlichen Oberflächen unterscheiden. Ein stark deformierter Zellkern, der vollständig zwischen den Säulen sitzt wird nur für Felder beobachtet, bei denen der Abstand zwischen den Säulen mindestens 3 μm beträgt. Für diese Fälle wird auch eine größere Zahl an Adhäsionspunkten an den Säulenseitenwänden beobachtet.

Zum Vergleich: Ist das gesamte Säulenfeld mit einem Hydrogel beschichtet, so wird die Zelladhäsion komplett unterdrückt. Falls nur die Deckflächen zellanziehend ausgestaltet sind, so findet man eine schwache Zelladhäsion. Dies kann

die Folge dessen sein, dass auf den kleinen Deckflächen nur eine ungenügende Zahl an Adhäsionspunkten ausgebildet werden kann.

Diese Zusammenhänge werden derzeit weiter untersucht, wofür auch die in Mulhouse möglichen Mikroskopiertechniken an lebenden Zellkulturen zum Einsatz kommen.

Literatur

- [1] SB. Rodan, et al., *Cancer Res.* 1987: 47 (18), 4961–6.
- [2] P. Davidson, PhD thesis, University of Mulhouse 2011.
- [3] F. Badique, et al., *Biomaterials* 2013: 34 (12), 2991-3001.
- [4] M. Eichhorn, C. Stannard, K. Anselm, J. rühe, *J. Mater. Sci. – Mater. Med.*, 2015: 26, 108
- [5] A. Wörtz, et al., *J Mater Chem* 20n2: 22, 19547–19561.

The interaction of cells with nano and microstructured surfaces

Melanie Eichhorn¹, Oswald Prucker¹,
Karine Anselme², Jürgen Rühle¹

¹IMTEK, University of Freiburg, ²Institut de Science des Matériaux de Mulhouse, CNRS UMR7361

Project funding: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – IRTG Soft Matter Science

This study represents an interdisciplinary project between biologist from the University of Mulhouse and researchers from the Department of Microsystems Engineering at the University of Freiburg.

The use of artificial materials for medical applications requires an understanding and control of cell adhesion to synthetic surfaces. This is especially important when implanted devices are considered, which are in long-term contact with the patient.

Three main factors influence the strength of interaction of cells (and in some cases cell organelles) with surfaces: topography/surface roughness, surface chemistry, and mechanical properties (Fig. 1) of the material considered.

All three parameters play an important role in the interaction between the surface, the extracellular matrix and the cell membrane.

An interesting case is the behavior of bone cells, SaOs-2 cells (Sarcoma osteogenic) which exhibits strong deformation of the cell nucleus when brought into contact with microstructured surfaces [1-3]. SaOs-2 is a permanent, human osteoblast-like cell line derived from a bone tumor and serves as a model for the behavior of deformable cancer cells.

We have now generated microstructured surfaces in the shape of micropillar arrays of defined size, shape and spacing.[4] The sizes of the pillars and the interpillar spacings were varied between 4 and 9 μm , which are significantly smaller than that of the cells studied. The height of the pillars was set to 10 μm . The pillars are generated from a photochemically crosslinked rubber (poly (n-butylacrylate) (see Fig. 2).

Additionally, we have developed ways to modify these arrays such that their surface is cell attractive or repulsive in pre-determined areas such as the pillar heads or the "valleys" between the pil-

lars. The surface modification was achieved by a combination of microcontact printing, which allowed to spatially control and ink deposition and photochemical reactions leading to crosslinking of this ink. For the latter process a novel photochemically induced C,H insertion crosslinking (CHic) process was employed, which allowed the covalent attachment of polymers to the employed polymeric substrates.

A very interesting result was found for pillar arrays in which the top faces of the pillars were coated with a cell repellent hydrogel [5] whereas the side walls and the areas in between the pillars remained cell attractive.

Figure 3 shows cells which have been seeded on such surface architectures. The surface layers attached to the top faces of the pillars are marked with a red fluorescence dye and the cells nuclei are stained in blue.

It was observed that a cell repellent coating deposited only on the top face of the pillars does not prevent cells from growing on the substrate, but the cell density on these samples is strongly reduced compared to surfaces carrying no such coating. In many cases the cell nuclei were strongly deformed. Different thresholds for this deformation were found on these structures and these can be compared to the results obtained from uncoated, i.e. entirely cell attractive structures. A deformed nucleus fully sitting between the pillars can only be observed with a repellent top coating at a pillar spacing of 3 micrometers as it is shown in Fig. 3. A higher number of focal adhesion points especially at the side walls of the pillars could also be detected on these structures.

For comparison: A hydrogel coating which fully covers the microposts prevents cell adhesion effectively. If only the top faces are cell attractive, a weak adhesion of the cells on the cell attractive pillar tops is observed. This may be a result of either fewer or smaller focal adhesion points.

We plan to perform further studies in this direction using the live cell imaging facilities at Mulhouse.

Fig. 1: Surface parameters which control the interaction of biological environments with microstructured surfaces. © CPI, IMTEK Univ. of Freiburg.

Fig. 2: Microscope image of a micropillar array generated from poly (n-butylacrylate) © CPI, IMTEK Univ. of Freiburg.

Fig. 3: SaOs-2 bone cancer cells (fixed) on micropillars 11 x 11 µm, height 10µm, spacing 3µm. Nuclei labeled in blue, repellent top coating (PDMAA) in red. © CPI, IMTEK Univ. of Freiburg.

Adhäsion und Reibung auf mikrostrukturierten Oberflächen: Inspiration von Insekt-Pflanze Interaktionen

C. Kumar^{1,2,3}, V. Le Houérou²,
T. Speck^{1,3} & H. F. Bohn^{1,3}

¹Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg,

²Institut Charles Sadron (ICS), CNRS UPR022, Université de Strasbourg, Strasbourg, Frankreich, ³Freiburger 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: Dr. Holger Bohn & Prof. Thomas Speck) mit Polymer-Tribologen der Physics-Mechanics and Tribology of Polymers Group des Institut Charles Sadron der Universität Strasbourg, Frankreich (PI: Dr. Vincent Le Houérou).

Grenzflächenphänomene wie Adhäsion und Reibung spielen sowohl in technischen wie auch biologischen Systemen eine wichtige Rolle. Sie treten stets auf, wenn zwei Oberflächen in Kontakt kommen. Beispiele hierfür sind: gehen über den Boden; ein Gecko, der eine Wand emporklettert; die Interaktion zwischen einem Autoreifen und der Straße; Bewegen des Fingers über ein Touchpad oder die Schreib-/Lesekopf-Platten-Grenzfläche in einer Festplatte. In vielen technischen Polymersystemen, stellen die Adhäsions- und Reibungseigenschaften der wechselwirkenden Oberflächen (eine oder beide aus Polymeren) eine Schlüsseleigenschaft für die Kontrolle der Leistung und Haltbarkeit dar. Die Feineinstellung der Reibungs- und Adhäsionseigenschaften wird noch entscheidender, wenn sich bei Anwendungen im Mikro- und Nanomaßstab das Oberflächen-zu-Volumenverhältnis stark vergrößert. Insbesondere benötigt man hierbei eine niedrige Adhäsion für einfache Anheftung und Ablösung [1, 2]. Ein wichtiger Faktor für die Kontrolle der Adhäsions- und Reibungskräfte bei Polymeroberflächen ist ihre reale Kontaktfläche [3]. Die reale Kontaktfläche hängt neben den Materialeigenschaften, insbesondere von der Oberflächenrauheit und gegebenenfalls Mikrostrukturierung der Oberflächen ab [4]. Auch in der Na-

tur spielen Adhäsion und Reibung bei der Interaktion von biologischen Systemen miteinander oder mit der unbelebten Umwelt eine wichtige Rolle. So besitzen beispielsweise Insekten hoch angepasste Haftsysteme, die es Ihnen ermöglichen auf unterschiedlichsten Pflanzenoberflächen Halt zu finden [5]. Demgegenüber besitzen zahlreiche Pflanzen angepasste Oberflächen, die die Haftung von Insekten unterbinden bzw. stark verringern. So können Insekten problemlos an Blütenblättern Halt finden, was Ihnen auf manchen Blattoberflächen, wie denen des Parakautschukbaumes (*Hevea brasiliensis*) jedoch nicht gelingt (Abb. 1) [6].

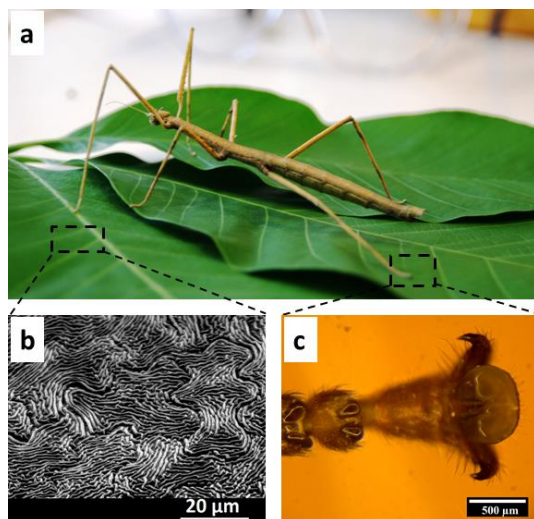


Abb. 1: Stabschrecke, die versucht auf den Blättern des Parakautschukbaumes (*Hevea brasiliensis*) Halt zu finden (a). (b) REM Aufnahme der Blattoberfläche von *H. brasiliensis*. Die puzzleteil-förmigen Epidermiszellen sind mit feinen Kutikularfalten bedeckt. (c) Stereomikroskopbild des Tarsus einer Stabschrecke (*Carausius spec.*) mit paarigen Krallen und dem dazwischenliegenden Haftkissen (Arolium). © Plant Biomechanics Group, Freiburg.

Auf Pflanzenoberflächen haben sich hoch spezifische, vielgestaltige Oberflächenstrukturen mit unterschiedlichen

Größen, Formen und hierarchischen Anordnungen entwickelt, die für unterschiedliche Funktionen optimiert sind, wie die selbstreinigenden Eigenschaften der Lotus-Blätter oder die rutschigen Oberflächen zum Fang von Insekten bei karnivoren Pflanzen [7, 8]. Im Hinblick auf Reibungs- und Haftungsphänomene finden sich bei Insekt-Pflanze-Interaktionen auffällige Gemeinsamkeiten mit technischen Polymer-Mikrosystemen. Zunächst, spielen Oberflächenmikrostrukturen und die Oberflächenchemie in beiden Systemen eine wichtige Rolle für die Leistungsfähigkeit der Systeme [9]. Darüber hinaus sind die Längenskalen der Oberflächenstrukturen und die mechanische Interaktion in beiden Systemen vergleichbar [10, 11].

Ziel des Projekts ist es diese Überlegungen in einen größeren Kontext zu setzen, welcher die Reibungs- und Adhäsionseigenschaften von mikrostrukturierter Polymeroberflächen (inspiriert von Pflanzenoberflächen; siehe Abb. 1b) im Kontakt mit einer Polymersonde (inspiriert von Insektenhaftstrukturen; siehe Abb. 1c) analysiert. Folgende Arbeitspakete sind dabei geplant:

- Herstellung und Charakterisierung von bio-inspirierten, mikrostrukturierter Oberflächen
- Experimentelle Untersuchungen der Kontaktmechanik an den strukturierten Oberflächen
- Computergestützte Numerische Modellierung

Zunächst wurden drei verschiedene Modell-Blattoberflächen (*H. brasiliensis*, *Litchi chinensis* und *Ludisia discolor*) aufgrund ihrer Unterschiede in Größe (von 1 µm bis wenige 100 µm), Form und hierarchischer Anordnung der Oberflächenmikrostrukturen ausgewählt.

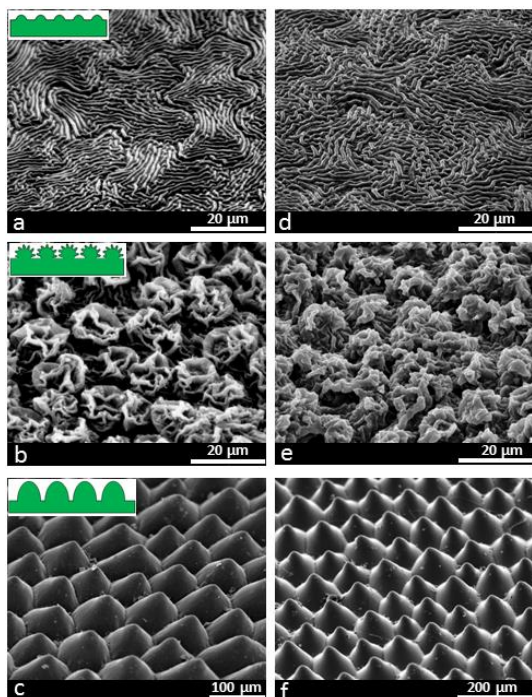


Abb. 2: REM-Bilder der originalen Pflanzenoberflächen (a-c) und ihrer Polymerrepliken (d-f). Piktogramme in der oberen linken Ecke zeigen die Art der Strukturierung. (a, d) *H. brasiliensis* (adaxiale Blattoberfläche; feine Oberflächenstrukturen); (b, e) *Litchi chinensis* (abaxiale Blattoberfläche; hierarchische Oberflächenstrukturen); (c, f) *Ludisia discolor* (adaxiale Blattoberfläche; grobe Oberflächenstrukturen). © Plant Biomechanics Group, Freiburg.

Darüber hinaus haben Prüm et al. [6] in vorherigen Arbeiten gezeigt, dass die Blattoberflächen von *H. brasiliensis* und *L. chinensis* aufgrund ihrer Mikrostrukturierung anti-adhäsive Eigenschaften für Insekten haben. Eine einfache, schnelle und präzise Replikationsmethode zur Übertragung der Oberflächenstrukturen von den Blättern in hochtransparentes, weiches Polymermaterial wurde entwickelt. Diese Repliken werden verwendet um Adhäsions- und Reibungsmessungen mit gleichzeitiger Erfassung der Kontaktfläche durchzuführen. Zur Oberflächencharakterisierung und Qualitätskontrolle der Replikationsmethode wer-

den sowohl die Pflanzenoberflächen als auch ihre Polymerrepliken mittels Konfokaler Laser-Scanning-Mikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie untersucht (Abb. 2).

In der zweiten Projektphase wird das Reibungsverhalten der replizierten Pflanzenoberflächen im gleitenden Kontakt mit einer Polymerhalbkugel (inspiert von den Haftstrukturen (Arolium) eines Insekts; vergleiche Abb. 1c) untersucht. Für eine detaillierte Analyse der Kontaktmechanik sind die Reibungsmessungen mit einer simultanen Visualisierung der Kontaktfläche gekoppelt (Abb. 3a). Des Weiteren werden die Adhäsionseigenschaften mittels „dynamischer JKR“ [12] und Pull-off-Tests untersucht (Abb. 3b).

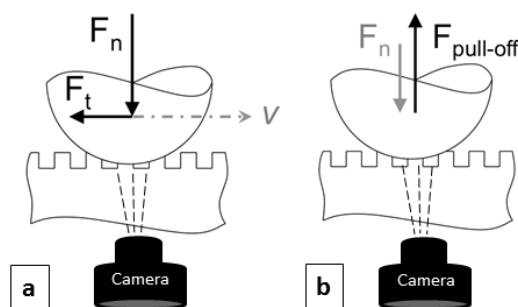


Abb. 3: Vereinfachte schematische Darstellungen von Reibungs- (a) und Pull-off-Tests (b) auf strukturierten Oberflächen mit simultaner Erfassung der Kontaktfläche. F_n : Normalkraft, F_t : Reibungskraft, v : Gleitgeschwindigkeit, $F_{\text{pull-off}}$: Pull-off-Kraft. © Institut Charles Sadron, Strasbourg

Zur Validierung der experimentellen Ergebnisse wird eine numerische Modellierung mittels Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt (MSC-Marc software). Mit dieser Methode lässt sich gezielt der Einfluss von Anordnung und Form der Oberflächenstrukturen sowie der hierarchischen Strukturierung unter-

suchen, wodurch eine Generalisierung der zugrundeliegenden physikalischen Parameter möglich wird.

Literatur

- [1] Z. Burton & B. Bhushan, *Nano lett.* 5, 1607-1613, (2005)
- [2] I. C. Gebeshuber & R. Gordon, *Micro and Nanosystems.* 3, 271–276, (2011)
- [3] M. Varenberg, A. Peressadko, S. Gorb & E. Arzt, *Appl. Phys. Lett.* 89, 121905, (2006)
- [4] N. Cañas, M. Kamperman, B. Völker, E. Kroner, R. M. McMeeking & E. Arzt, *Acta Biomater.* 8, 282-288, (2012)
- [5] D. Labonte & W. Federle, *Phil. Trans. R. Soc. B* 370, 1661:20140027, (2015)
- [6] B. Prüm, H. F. Bohn, R. Seidel, S. Rubach & T. Speck, *Acta Biomater.* 9, 6360–6368, (2013)
- [7] B. Bhushan & Y. C. Jung, *Prog. Mater Sci.* 56, 1–108, (2011)
- [8] C. Neinhuis & W. Barthlott, *Ann. Bot.* 79, 667-677, (1997)
- [9] B. Bhushan, Y. C. Jung & K. Koch, *Phil. Trans. R. Soc. A* 367, 1631–1672, (2009)
- [10] Y. Bar-Cohen, *Bioinsp. Biomim.* 1, 1–12, (2006)
- [11] B. Bhushan, *Langmuir* 28, 1698-1714, (2012)
- [12] M. Moreno-Couranjou, N. Blondiaux, R. Pugin, V. Le Houerou, C. Gauthier, E. Kroner, P. Choquet, *Plasma Process. Polym.* 11[7], 647-654, (2014)

Adhesion and Friction on Textured Surfaces: Inspiration from Insect-Plant Interactions

C. Kumar^{1,2,3}, V. Le Houérou²,
T. Speck^{1,3} & H. F. Bohn^{1,3}

¹Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg, ²Institut Charles Sadron (ICS), CNRS UPR022, Université de Strasbourg, Strasbourg, France, ³Freiburg Centre 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 study represents an interdisciplinary research project based on the collaboration of biologists/biomechanics of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg (PI: Dr. Holger Bohn & Prof. Thomas Speck) with polymer tribologists of the Physics-Mechanics and Tribology of Polymers Group from the Institut Charles Sadron, University of Strasbourg, France (PI: Dr. Vincent Le Houérou).

Interfacial phenomena like adhesion and friction are widespread in most physical man-made as well as biological systems. They occur when two surfaces come into contact. Examples include: walking over the floor, climbing of a Gecko over a wall surface, interaction between automobile tires and the road, scrolling your finger over a laptop touchpad or the head-disk interface in a data storage hard drive. In many polymeric technical systems, frictional and adhesive properties of interacting surfaces (one or both made of polymers) are the key features to control performance and durability. It is also of prior importance to fine tune frictional and adhesive

Highlights

properties when the surface to volume ratio gets *tremendously* increased in micro- and nano-contact applications. Especially it requires a low adhesion for easy attachment and detachment [1, 2]. A significant factor which controls adhesion and friction force between polymer surfaces is the real area of contact [3]. Apart from the material properties, the real area of contact strongly depends on the surface roughness and micro-structuring of the interacting surfaces [4]. If we look into nature, adhesion and friction play an important role for the interaction of biological systems between each other or with the inanimate environment. Especially insect attachment systems evolved in such a way to facilitate climbing on, sticking to or walking over different plant surfaces [5]. On the other hand many plants possess surfaces impeding or markedly reducing insect attachment. Interestingly insect legs can well attach to flower petals but are on the other side unable to find hold on various leaf surfaces like the leaves of the rubber tree (*Hevea brasiliensis*) (Fig. 1) [6]. On plant surfaces, highly specific and unique surface structures with a different shape, size and hierarchical patterns evolved, optimising their functions like the self-cleaning properties of lotus leaves and insects trapping in carnivorous plants (slippery surfaces) [7, 8]. In respect to friction and adhesion phenomena, insect-plant interactions possess conspicuous similarities with technical polymer-microsystems. At first, in both systems surface micro-structuring and surface chemistry play an important role on the system's performance [9]. Furthermore, both systems have an almost similar length scale of surface structures and mechanical interaction [10, 11].

Altogether, this project intends to integrate these considerations in a larger study which addresses frictional and adhesion properties of micro-textured soft matter polymeric surfaces (directly inspired from plant leaf surfaces; see Fig. 1b) in contact with the polymeric probe (inspired from insect's feet; see Fig. 1c). The main research approaches to achieve the project aims are as following:

- Fabrication and characterization of bio-inspired micro-textured surfaces made of polymeric soft matter.
- Adhesion and friction mechanics: experimental study of textured surfaces.
- Numerical modelling.

At first, three different model plant leaves (*H. brasiliensis*, *Litchi chinensis* and *Ludisia discolor*) were chosen according to their specific functionality and to the different sizes (in range of 1 μm to few 100 μm), shape and morphology of their surface microstructures. Additionally, in previous work Prüm et al. [6] showed that the leaf surfaces of *H. brasiliensis* and *L. chinensis* possess anti-adhesive properties for insects resulting from their micro-structuring. A simple, fast and precise double casting micro-replication technique was established to transfer plant leaf microstructures into highly transparent soft polymer material. These replicas will be used to perform adhesion and friction investigations with simultaneous visualisation of the contact with the probe. For surface characterization and evaluation of the replication technique, both original plant leaves and replicated polymeric surfaces are analysed using confocal laser scanning microscopy and scanning electron microscopy (Fig. 2).

In the second phase of the project, the friction response of the replicated surfaces under sliding contact against a half spherical polymeric (soft matter) probe (which is inspired from adhesive pads (Arolium) of insects (see Fig. 1c)) will be investigated. For in-depth analysis of the contact mechanics, the friction measurements are coupled with in-situ visualization of the contact area (Fig. 3a). Furthermore, adhesion properties will also be investigated by using a “dynamic JKR” [12] and pull-off tests (Fig. 3b).

In order to validate the results from friction and adhesion experimental investigation, numerical modelling will be performed by using finite element analysis (MSC-Marc software). Numerical modelling will benefit us to study the influence of pattern’s shape and scale; as well as the effect of superimposed second order structures (hierarchy) on friction and adhesion. It also allows to the generalization of the underlying physical principles.

Fig. 1: Photograph of stick insect trying to find perfect hold on the rubber tree (*Hevea brasiliensis*) leaves (a). (b) SEM image of the leaf surface of *H. brasiliensis*. The puzzle piece-shaped epidermal cells are covered with fine cuticular folds (c) Stereo microscope image of tarsus of the stick insect (*Carausius spec.*) with paired claws and the intervening adhesive pad (Arolium). © Plant Biomechanics Group Freiburg.

Fig. 2: SEM images of original plant leaf surfaces (a-c) and their polymer replicas (d-f). Pictograms on the top-left corner of left side images represent the type of structuring. (a, d) *H. brasiliensis* (adaxial leaf surface; fine micro-structures); (b, e) *Litchi chinensis* (abaxial leaf surface; hierarchical surface structures); (c, f) *Ludisia discolor* (adaxial leaf surface; coarse surface structuring). © Plant Biomechanics Group Freiburg.

Fig. 3: Simplified sketch of friction tests (a) and pull-off tests (b) on textured surfaces

together with in-situ visualization of the contact. F_n : normal force, F_t : friction force, V : sliding velocity, $F_{pull-off}$: pull-off force. © Institut Charles Sadron, Strasbourg.

Bionische Lignocellulose-basierte Komposite mit innovativem Verarbeitungskonzept (LIGNOSIT)

Hatem Abushammala^{1,2}, Jia Mao^{1,2}, Gopakumar Sivasankarapillai¹, Marie-Pierre Laborie^{1,2}

¹Professur für Forstliche Biomaterialien, Universität Freiburg, ² Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien, Universität Freiburg

Förderung: Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Baden-Württemberg

Im Gegensatz zu den Zuckerkomponenten von Lignocellulose findet Lignin selbst keine Verwendung. Weltweit werden jährlich ca. 50 Millionen Tonnen Lignin produziert, die schließlich zur Energieerzeugung [1] verbrannt werden.

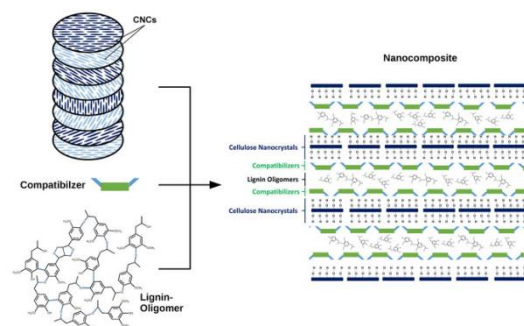


Abb. 1: Der Organisationszustand der Compositbestandteile; Lignin, CNCs und Verträglichkeitsvermittler. © H. Abushammala

Daher ist die Verwertung von Lignin in hochwertigen Funktionsmaterialien nach wie vor ein wichtiger Teil einer Lignocellulose-Bioraffinerie. Trotz der Tatsache,

Highlights

dass Lignin amorph ist und eventuell im hochplastischen, gummielastischen Zustand eine gewisse Fließfähigkeit zeigt, bleibt die Schmelzverarbeitung problematisch.

Das LIGNOSIT Projekt zielt auf die Entwicklung eines innovativen Verarbeitungsansatzes für Lignin durch die Mischung mit einer flüssigkristallinen Phase von Cellulose-Nanokristallen (CNCs) (Abb. 1). Es wird angenommen, dass das Mischen von Lignin mit einem flüssigkristallinen Material eine verbesserte Fließfähigkeit ermöglicht und dass sich der Verbundwerkstoff im Zuge der Verfestigung strukturell organisiert.

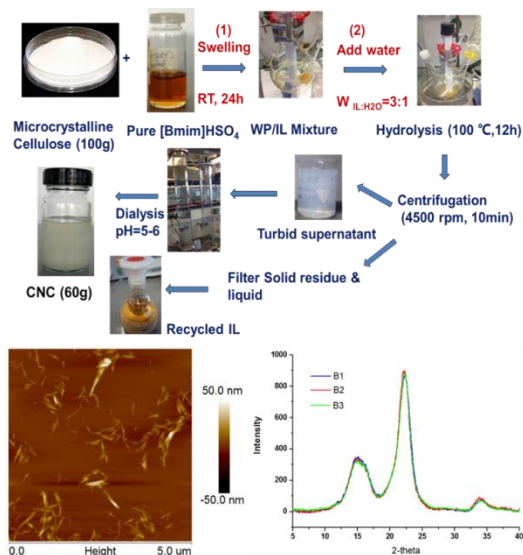


Abb. 2: Das Herstellungsverfahren für CNCs mit ionischen Flüssigkeiten. © J. Mao

Um diese Hypothesen zu überprüfen, werden zwei Hauptziele verfolgt. Zunächst wird vorgeschlagen, das flüssigkristalline Verhalten der Cellulose-Nanokristalle und der Lignin-Mischungen als eine Funktion der Zusammensetzung und der Temperatur zu verstehen. Zweitens sollen die Auswirkungen einer Kompatibilisierung auf die Morphologie

und die Verarbeitungseigenschaften bewertet werden. Zu diesem Zweck sollen Lignin/Cellulose-Blockcopolymere synthetisiert werden und als Verträglichkeitsvermittler in diesem flüssigkristallinen Nanokomposit dienen.

Entsprechend haben wir zunächst CNC in großem Maßstab hergestellt und charakterisiert [2]. Und zwar wurde durch ein Upscaling der CNC-Herstellung bis zu 100 g des Cellulose-Ausgangsmaterials im Vergleich zu der üblichen Menge von 1 g verwendet [2]. Die produzierten CNC wurden charakterisiert und die Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Ausbeute (60 %) und der Eigenschaften wurde dargestellt. Im Scale-Up-Verfahren konnten CNC mit einer Ausbeute von 60 % gewonnen werden, einer geringeren Ausbeute gegenüber dem ursprünglichen Verfahren (ca. 80 %). Zudem waren die gewonnenen Nanokristalle mit einer Breite von ca. 7 nm (ursprünglich ca. 4-5 nm) dicker. Der Kristallinitätsindex der CNC beläuft sich auf etwa 90 %.

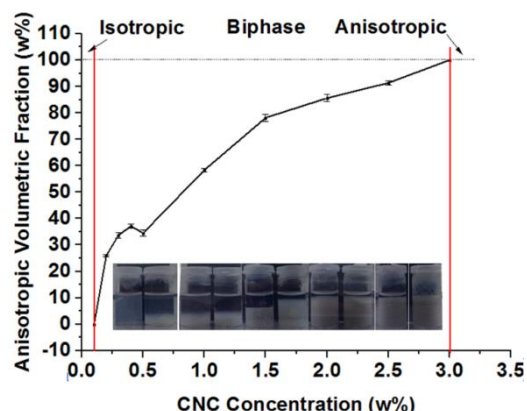


Abb. 3: Phasendiagramm von CNCs mit unterschiedlichen Konzentrationen. © J. Mao

Im Anschluss wurde das flüssigkristalline Verhalten der Cellulose-Nanokristalle

beurteilt. Wie erwartet, entwickelt sich in CNC-Suspensionen mit zunehmender Konzentration die isotrope zur anisotropen Phase (Abb. 3). Wie gleichermaßen erwartet, bildet sich ab einer Konzentration von ca. 0,2 Gew.-% ein Zweiphasen-Bereich aus. Dass der Wert deutlich niedriger als der in der Literatur angegebene (ca. 2 %) [3] ist, liegt möglicherweise an Unterschieden im Aspektverhältnis der CNC. Die anisotrope Phase wird bei einer Konzentration von mehr als 3,0 Gew.-% erreicht. Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) und Polarisationsmikroskopie (POM) werden derzeit verwendet, um die Darstellung der Phasendiagramme zu unterstützen.

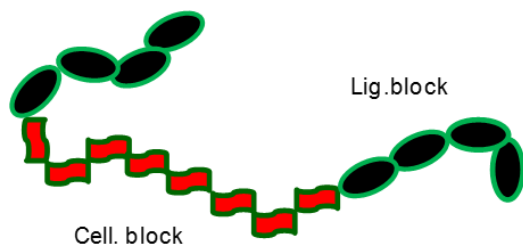


Abb. 4: Die Struktur des Blockcopolymeren.
© G. Sivasankarapillai

Weiterhin wurde die Synthese von Copolymeren durchgeführt. In diesem Fall ist die Zielstruktur ein Blockcopolymer aus Lignin und Cellulose-Derivaten, da diese Komponente als Phasenvermittler zwischen dem amorphen Lignin und den flüssigkristallinen Phasen agieren soll. Zu diesem Zweck wurde der Synthese-Ansatz von Oliveira und Glasser verfolgt.

Monofunktionelle 1-Hydroxy-Cellulosepropionat-Blöcke mit unterschiedlichem Polymerisationsgrad wurden durch Abspaltung von Halogenwasserstoff unter Veresterungsbedingungen nach einem veröffentlichten Verfahren [5] hergestellt.

Diese monofunktionellen Blöcke können dann durch ihre Hydroxyfunktionalität mit niedermolekularen Lignin-Blöcken reagieren, um Blockcopolymeren mit kontrollierter Architektur zu ergeben. Die dahingehenden Versuche sind derzeit im Gange.

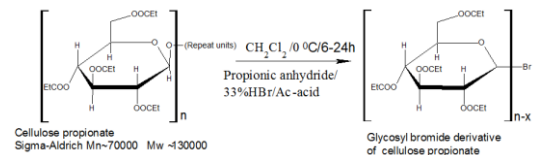


Abb. 5: Herstellung des Cellulose-Blocks durch Depolymerisation und Funktionalisierung von Cellulosepropionat. © G. Sivasankarapillai

Literatur

- [1] W. Glasser, *Gülzower Fachgespräche*, 31, 42-44, (2009)
- [2] J. Mao, A. Osorio-Madrado & M.-P. Laborie. *Cellulose*. 20.4, 1829-1840, (2013)
- [3] P. J. Hyun, J. Noh, C. Schütz, G. Salazar-Alvarez, G. Scalia, L. Bergström, & J. Lagerwall. *ChemPhysChem*. 15, 1477-1484, (2014)
- [4] D. Oliveira & W. Glasser. *Polymer*. (35), 9, 1977-1985, (2009)
- [5] T. Metzger & H. Cantow. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*. 116, 13-27, (1983)

Bionic Lignocellulose-Based Composites using Innovative Processing Concept (LIGNOSIT)

Hatem Abushammala^{1,2}, Jia Mao^{1,2}, Gopakumar Sivasankarapillai¹, Marie-Pierre Laborie^{1,2}

¹Chair of Forest Biomaterials, University of Freiburg, ²Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies, University of Freiburg

Funding: Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Baden-Württemberg

In contrast to the sugar components of lignocellulose, lignin is underutilized. Ca. 50 million tons of lignin is produced annually around the world, which are finally burnt for energy [1]. Therefore, the valorization of lignin into high-value functional materials remains an important part of a lignocellulose biorefinery. Despite the fact that lignin is amorphous and might display some ability to flow under highly plasticized rubbery state, its melt-processing remains problematic. The LIGNOSIT project aims at developing an innovative processing approach for lignin by mixing it with a liquid crystalline phase of cellulose nanocrystals (CNCs) (Fig. 1). It is hypothesized that blending lignin with a liquid crystalline material can afford flow ability and that upon solidification; the composite materials might organize in a structured manner.

To test these hypotheses, two main goals are pursued. First, it is proposed to understand the liquid crystalline behavior of cellulose nanocrystals and lignin mixtures as a function of composition and temperature. Second the impact of compatibilization on blend morphology and on processing properties should be assessed. To that end, lignin /cellulose block copolymers shall be synthesized

and play the role of compatibilizers in these liquid crystalline polymer blends.

We therefore first produced and characterized CNCs in a large scale [2]. Namely, the CNC production was scaled-up to 100 g of starting cellulose materials compared to the typical scale in the 1g scale [2]. The produced CNCs were characterized and reproducibility was demonstrated in terms of yield (60 %) and properties. In the scaled-up procedure, the CNCs were obtained in a lower yield of ca. 60 % compared to the original method (ca. 80 %) and were thicker with a width of ca. 7 nm (originally ca. 4-5 nm). The crystallinity index of the CNCs was around 90 %.

The liquid crystalline behavior of cellulose nanocrystals was then assessed. As expected, CNC suspensions develop from isotropic to anisotropic phase with increasing concentration (Fig. 3). Also as expected, a biphasic is evident at a concentration of ca. 0.2 % (w/w), which is significantly lower than that reported in the literature (ca. 2 %) [3], possibly due to differences in CNCs aspect ratios. The anisotropic phase is achieved at a concentration higher than 3.0 %. Differential scanning calorimetry (DSC) and polarized optical microscopy (POM) studies are ongoing to further help establish phase diagrams.

Second the synthesis of copolymers was undertaken. In this case the targeted structure is a block copolymer of lignin and cellulose derivatives since this component should act as compatibilizer between amorphous lignin phases and liquid crystalline phases. To that end the synthetic approach pioneered by Oliveria and Glasser was pursued.

Namely monofunctional 1-hydroxy cellulose propionate blocks of varying degree of polymerization were prepared by hydrogen halide cleavage under esterification conditions according to a published procedure [5]. These monofunctional blocks can then react through their hydroxy-functionality with low molecular weight lignin blocks to yield block copolymers with controlled architecture. Efforts are currently ongoing in this direction.

Fig. 1: The organization state of the composite components; Lignin, CNCs, and compatibilizer. © H. Abushammala

Fig. 2: The production method of CNCs using ionic liquids. © J. Mao

Fig. 3: Phase diagram of CNCs using different concentrations. © J. Mao

Fig. 4: The structure of the block copolymer. © G. Sivasankarapillai

Fig. 5: Preparation of the cellulose block by depolymerization and functionalization of cellulose propionate. © G. Sivasankarapillai

Thermodynamik von Membranen mit komplexer Lipidzusammensetzung

R. Kociurzynski¹, F. Thalmann²,
V. Knecht¹

¹Physikalisches Institut, Universität Freiburg und Freiburger Zentrum für Interaktive Materialien und Bioinspirierte Technologien (FIT),

²Institute Charles Sadron, University of Strasbourg

Projektförderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft – IRTG 1642 “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials” – Projekt C5

Biologische Membranen bestehen aus einer komplexen Mischung verschiedener Lipidspezies, die sich in der Größe und Ladung ihrer Kopfgruppen sowie

der Länge und Sättigung ihrer Kohlenwasserstoffketten unterscheiden. Letztere führen zu gegenseitigen Diskrepanzen in der Länge der hydrophoben Segmente, welche dazu beitragen, dass die Moleküle verschiedener Spezies nicht homogen gemischt sind, sondern oft eine Tendenz zur gegenseitigen Entmischung aufweisen.

Die Untersuchung des Phasenverhaltens komplexer Lipidmischungen stellt in vielfacher Hinsicht eine Herausforderung dar. Eine der Schwierigkeiten ist das Auftreten kritischen Verhaltens, welches durch Fluktuationen auf allen Zeit- und Längenskalen charakterisiert ist und somit mesoskopische Skalen involviert. Auf der anderen Seite hängt das Verhalten von Mischungen von der molekularen Architektur der beteiligten Spezies und somit von Eigenschaften auf Nanoskalen ab. Um beide Skalen miteinander zu verknüpfen, wenden wir einen zweiskaligen Ansatz an. Molekulardynamik(MD)-Simulationen in Verbindung mit einer fast atomaren Beschreibung über das MARTINI-Modell [1] (*fast atomares Modell*) werden verwendet zur Parameterisierung einer vereinfachten Behandlung, in der jedes Lipidmolekül als einzelnes Teilchen in zwei Dimensionen beschrieben wird (*einfache Flüssigkeit in 2D*). Zu diesem Zweck werden die MD-Simulationen benutzt, um die laterale Verteilung der Lipide relativ zueinander über radiale Verteilungsfunktionen (Paarkorrelationsfunktionen) zu untersuchen. Aus den Paarkorrelationsfunktionen werden effektive Paarpotentiale für die Modellierung als einfache Flüssigkeiten deduziert.

Die radiale Verteilungsfunktion $g_{AB}(r)$ für zwei Lipidspezies A und B beschreibt die Häufigkeit, mit der ein Molekül der Spezies B im Abstand r von einem Mo-

lekül der Spezies A gefunden wird, relativ zur Häufigkeit zweier Moleküle in diesem Abstand für ein ideales Gas. Die einfachste Methode, ein effektives Paarpotential $u_{AB}(r)$ für die Wechselwirkung eines Moleküls der Spezies A mit einem der Spezies B aus der entsprechenden Paarkorrelationsfunktion $g_{AB}(r)$ abzuschätzen ist die Boltzmann-Inversion gemäß $u_{AB} = -k_B T \ln g_{AB}(r)$, wobei k_B die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur bezeichnet. Abb. 1 zeigt entsprechende Paarpotentiale aus Simulationen binärer Mischungen, die aus Palmitoyl-oleoylphosphatidylcholin(POPC) und Palmitoyl-oleoylphosphatidylethanolamin(POPE) oder Dipalmitoylphosphatidylcholin(DPPC) und Glykoceramid(DPGS) unter Berücksichtigung verschiedener Mischungsverhältnisse zusammengesetzt sind.

Aus Simulationen jedes Mischungsverhältnisses wurden entsprechende Paarpotentiale ermittelt. Für ein physikalisch konsistentes Modell einer einfachen Flüssigkeit sollten die extrahierten Paarpotentiale unabhängig sein von den Mischungsverhältnissen, welche in den MD-Simulationen verwendet wurden. In guter Näherung ist dies für POPC-POPE-Wechselwirkungen der Fall, vermutlich weil die beiden Lipiden einander sehr ähnlich sind. Für DPGS-DPGS-Wechselwirkungen hängen die ermittelten Paarpotentiale deutlich von den Mischungsverhältnissen ab.

Der Grund für diese Abhängigkeit ist, dass Boltzman-Inversion nur eine genäherte Beziehung zwischen einer Paarkorrelationsfunktion und dem zugehörigen Paarpotential darstellt. Eine genauere Beschreibung unterscheidet zwischen direkten und indirekten Korrelationen unter Verwendung der Ornstein-

Zernike-Theorie. Entsprechende Analysen sind in Bearbeitung.

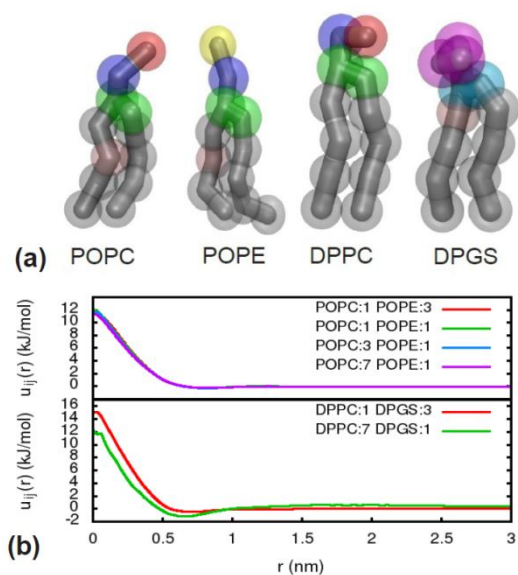


Abb. 1: (a) Fast-atomare Darstellungen für die untersuchten Lipidspezies. In den Modellen werden im Mittel vier Schweratome auf ein Teilchen abgebildet. Farben unterscheiden zwischen Cholin (altrosa), Phosphat (blau), Glycerinrückrat (grün), voll gesättigten Kettensegmenten (grau), Kettensegmenten, die eine ungesättigte Bindung enthalten (rosa), Ethanolamin (gelb), Ceramidrückrat (cyan) und Glucoseresten (violett). (b) Effektive Paarpotentiale für einfache Flüssigkeit für (oben) POPC-POPE- und (unten) DPGS-DPGS-Wechselwirkungen. Die Paarpotentiale wurden aus den radialen Verteilungsfunktionen der Masseschwerpunkte der Lipidmoleküle in binären Mischungen verschiedener Mischungsverhältnisse gewonnen. © Membrane MD Group Freiburg

Literatur

- [1] S. J. Marrink, H. J. Risselada, S. Yefimov, D.P. Tieleman, A.H. de Vries, J. Phys. Chem. B 111, 7812-7824, 2007
- [2] J.-P. Hansen, I. R. McDonald, Theory of Simple Liquids, Academic Press, 3rd edition, 2006

Thermodynamics of membranes with complex lipid compositions

R. Kociurzynski¹, F. Thalmann²,
V. Knecht¹

¹Institute of Physics, University of Freiburg and Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT),

²Institute Charles Sadron, University of Strasbourg

Project funding: German Research Foundation (DFG) – IRTG 1642 “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials” – Project C5

Biological membranes consist of a complex mixture of lipid species that differ in the size and charge of their headgroups as well as the length and degree of unsaturation of the hydrocarbon tails. The latter leads to mutual hydrophobic mismatches which is one of the reasons why molecules of different species are not mixed homogeneously but often show a tendency to partially demix from each other. Furthermore, cholesterol molecules, often present in considerable amount in eukaryotic membranes, significantly alter the structure and dynamics of the major phospholipid components, resulting in the emergence of new order liquid phases.

The phase behavior of complex lipid mixtures poses a number of challenges. One of them is the emergence of critical behavior which is characterized by a divergence in the length and time scales over which (e.g., compositional) fluctuations are correlated, thus involving mesoscopic scales. On the other hand, the behavior of the mixtures depends on the molecular architecture of the species involved and, thus, on nanoscale properties. In order to link both scales with each other, we apply a dual scale approach. Molecular dynamics (MD) simu-

lations in conjunction with a near-atomistic description via the MARTINI coarse grained model [1] (*near atomic model*) are employed to parametrize a simplified treatment in which each lipid molecule is described as a single particle in 2d (*simple liquid model*). To this aim, the near-atomic model is employed to study the lateral distribution of the lipids with respect to each other using radial distribution functions (rdfs), also denoted as pair correlation functions. From these rdfs, effective pair potentials for the simple liquid model are inferred.

The radial distribution function $g_{AB}(r)$ between two lipid species A and B describes the frequency with which a lipid of species B can be found at distance r from a lipid of species A , relative to the frequency with which two lipids reside in this distance for an ideal gas. The simplest way to infer an effective pair potential $u_{AB}(r)$ for the interaction of a lipid of species A with one of species B from the rdf $g_{AB}(r)$ is to use Boltzmann inversion according to $u_{AB} = -k_B T \ln g_{AB}(r)$ where k_B is Boltzmann's constant and T the temperature.

Figure 1 shows corresponding effective pair potentials from simulations of binary mixtures composed of palmitoyl-oleoyl-phosphatidylcholine (POPC) and palmitoyl-oleoyl-phosphatidylethanolamine (POPE) or dipalmitoyl-phosphatidylcholine (DPPC) and glycosphingolipid (DPPG) considering various mixing ratios. From simulations of each ratio, respective pair potentials were inferred. For a physically consistent simple liquid model, the pair potentials extracted should be independent of the mixing ratio considered in the near-atomic model. To a good approximation, this is indeed the case for POPC-POPE interactions, presumably because the two

Highlights

lipids are very similar to each other. For DPGS-DPGS interactions, a significant dependence of the pair potentials of the mixing ratio is observed.

The reason for this dependence is that Boltzmann inversion only yields an approximate relation between a pair correlation functions and the respective pair potential. A more accurate treatment discriminates direct from indirect correlations using Ornstein-Zernike theory [2]. Corresponding analyses are underway.

Fig. 1: (a) Near-atomic representation for lipid species considered. In the models, on average four heavy atoms are mapped to a single bead. Colors distinguish between choline (dark pink), phosphate (blue), glycerol backbone (green), fully saturated tail segments (gray), tail segment containing an unsaturated bond (pink), ethanolamine (yellow), ceramide backbone (cyan), and glucose moiety (violet). (b) Effective pair potentials for simple liquid model for (top) POPC-POPE and (bottom) DPGS-DPGS interactions. The pair potentials were estimated from the radial distribution of the centers masses of corresponding lipid molecules in binary mixtures of various mixing ratios. © Membrane MD Group Freiburg

PROJEKTE

SFB-TRR 141

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

T. Speck

Plant Biomechanics Group Freiburg, 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“

Der SFB-Transregio 141 (TRR 141) läuft mit sieben der elf an der Universität Freiburg angesiedelten Projekten seit dem 1. Oktober 2014 am Freiburger Zentrum für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT). Nachdem im Jahr 2014 (fast) alle von der DFG geförderten Doktoranden/innen- und Postdoktoranden/innen-Stellen besetzt werden konnten, wurden im Berichtsjahr 2015 die interdisziplinär von Naturwissenschaftlern (Biologen, Physikern, Chemikern, Geologen), Materialwissenschaftlern, Ingenieuren und Architekten durchgeführten wissenschaftlichen Projekt bearbeitet. Neben den von den beteiligten Wissenschaftlern/innen in ihren jeweiligen Spezialgebieten durchgeführten Forschungen diente dieses erste Jahr auch der Etablierung der interdisziplinären Zusammenarbeit und dem Erarbeiten einer gemeinsamen für alle verständlichen „Wissenschaftsspra-

che“ in den FuE-Projekten [1]. Von großer Bedeutung hierfür sind neben den regelmäßigen Treffen in den einzelnen Projekten vor allem auch die in zweimonatigem Rhythmus stattfindenden TRR 141-Workshops. Sie finden im Wechsel an den am TRR 141 beteiligten Instituten in Stuttgart, Freiburg oder Tübingen statt und werden reihum von den am TRR 141 beteiligten Arbeitsgruppen organisiert.

Im Jahr 2015 fanden fünf TRR-Workshops zu verschiedenen Schwerpunktthemen statt.

Der 1. Workshop wurde von den Profs. Klaus Nickel, James Nebelsick und Oliver Betz zusammen mit ihren Mitarbeitern/innen organisiert und fand am 30. Januar 2015 am Institut für Angewandte Mineralogie der Universität Tübingen statt.

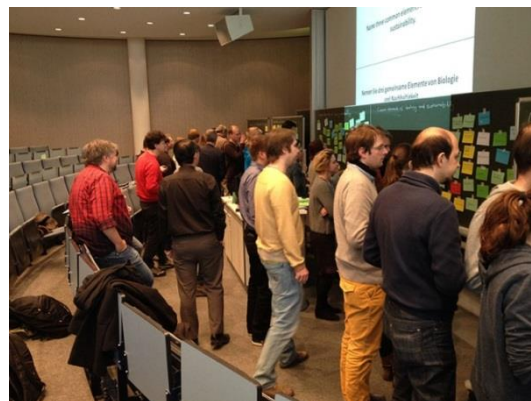


Abb. 1: TRR 141 Mitarbeiter/innen während des interaktiven Workshops zum Thema „Bionik und nachhaltige Entwicklung“. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Der 2. Workshop wurde von Dr. Olga Speck und den Mitarbeitern/innen des C01-Projekts „The Biomimetic Promise: Natural solutions as Concept Generators for sustainable Technology Development in the Construction Sector“ organ-

isiert. Er fand am 20. März 2015 im in den Räumlichkeiten des Instituts für Biologie I statt, da das Gebäude des Freiburger Zentrum für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT) noch nicht zur Verfügung stand. Schwerpunkt des Workshops war das Thema „Bionik und nachhaltige Entwicklung“ [2]. Die anwesenden TRR 141 Mitglieder füllten einen Fragebogen zu dieser Thematik aus, der von den Mitarbeitern/innen des C01-Projekts ausgewertet wird, und nahmen an einem interaktiven Workshop teil (Abb. 1). Der Themenschwerpunkt wurde durch einen Vortrag von Dr. Olga Speck zum Thema „Das Bionische Versprechen“ abgeschlossen (Abb. 2).



Abb. 2: Dr. Olga Speck während ihres Vortrags zum Thema „Das Bionische Versprechen“. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Für den 3. Workshop trafen sich die TRR 141 Mitarbeiter/innen am 08. Mai 2015 im Staatlichen Museum für Naturkunde Stuttgart. Das Kolloquium wurde von PD Dr. Anita Roth-Nebelsick und ihren Mitarbeitern/innen organisiert.

Der 4. Workshop fand am 10. Juli 2015 am Institut für Angewandte Mineralogie der Universität Tübingen statt und wurde wiederum von den Profs. Klaus Nickel,

James Nebelsick und Oliver Betz und ihren Mitarbeitern/innen organisiert.



Abb. 3: TRR 141 Mitarbeiter/innen während einer Diskussionsphase im Foyer des Freiburger Zentrums für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien. (© Antonia Duma, FIT)

Der 5. Workshop wurde von Dr. Renate Reiter und Prof. Günter Reiter organisiert und fand am 18. September 2015 als eine der ersten größeren Veranstaltungen am FIT statt (Abb. 3). Das Freiburger Zentrum für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien bietet mit seinen neuen Räumlichkeiten und aufgrund seiner interdisziplinären Ausrichtung eine ideale Plattform für den SFB-Transregio 141. Schwerpunkte waren die Präsentation der unter Freiburger Beteiligung laufenden TRR 141 Projekte B02 „Evolutionary processes driving biological variation and diversity as models for exploratory digital design tools in architecture“ und A09 „Analysis of Physcomitrella chloroplasts to reveal adaptation principles leading to structural stability at the nano-scale“, sowie des Projekts B05 „Structural design with biological methods: optimality, multifunctionality and robustness“. Die neuesten Ergebnisse dieser Projekte wurden vorgestellt und ausführlich diskutiert. In Anschluss daran gab Dr. Josef Madl (F-BIOSS) eine Einführung in die Atomic Force Microscopy (AFM). Für interes-

sierte Teilnehmer/innen wurden von Dr. Yi Thomann eine Demonstration von AFM-Messungen (Abb. 4) und von der Geschäftsleiterin des FIT Dr. Stephanie Meisen Laborführungen angeboten.

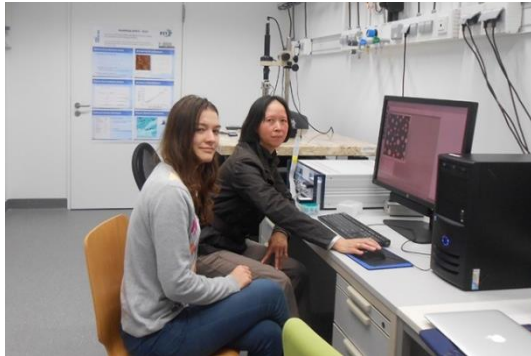


Abb. 4: Demonstration von AFM-Messungen durch Dr. Yi Thomann in den neuen FIT-Laborräumen. (© Renate Reiter, Experimentelle Polymerphysik Universität Freiburg)

Höhepunkt des Jahres 2015 war die „1st Conference Sonderforschungsbereich Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures“, die am 12. und 13. November 2015 in den Tagungsräumen des Museums am Löwentor in Stuttgart stattfand (Abb. 5). Durch die Lokation mit den für die Tagungsteilnehmer/innen zugänglichen Sammlungen war ein traumhaftes, den wissenschaftlichen Austausch stimulierendes Ambiente gegeben. An den beiden Tagen gab es 22 in Englisch gehaltene Vorträge zum Thema „Bionik und Architektur“, die von 6 eingeladenen internationalen Fachwissenschaftlern und 16 Mitgliedern des TRR 141 gehalten wurden. Die Tagung gliederte sich in die Themengebiete „Simulation und Modellierung“ (4 Vorträge), „Design und Konstruktion“ (9 Vorträge), „Botanik und Biodiversität“ (5 Vorträge) sowie „Zoologie, Paläontologie und Mineralogie“ (4 Vorträge).

Darüber hinaus wurden bereits im ersten Jahr seines Bestehens im Rahmen des TRR 141 fünf Publikationen in Peer Reviewed Journals, fünf Beiträge in wissenschaftlichen Büchern und zwei Conference Proceedings-Beiträge sowie zehn weitere Kurzbeiträge (Miscellaneous) veröffentlicht [vgl. 4-8]. Außerdem waren die Wissenschaftler/innen des TRR 141 im Jahr 2015 mit neun Interviews in verschiedenen Printmedien zu den im Rahmen des TRR 141 bearbeiteten Themen in der Öffentlichkeitsarbeit aktiv. Eine detaillierte und stets auf aktuellem Stand gehaltene Auflistung der Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsaktivitäten ist im Internet unter www.trr141.de öffentlich zugänglich. Hier findet sich auch eine ausführliche Darstellung der Struktur des SFB-TRR 141, der Inhalte der verschiedenen Projekte und der Portraits der beteiligten Forscher/innen.

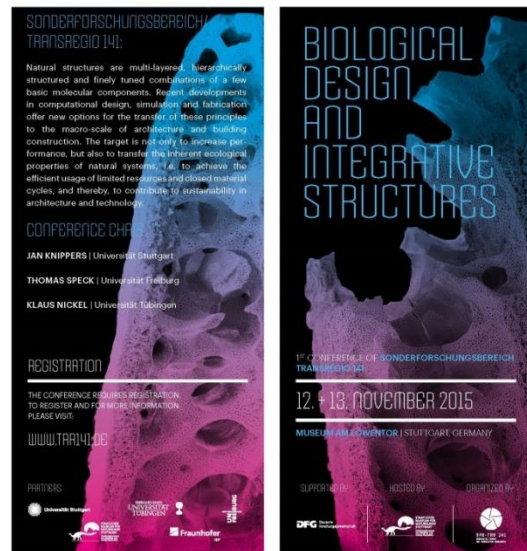


Abb. 5: Flyer der 1st Conference Sonderforschungsbereich Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures. © SFB-Transregio 141

Literatur

- [1] J. Knippers & T. Speck, *Bioinspir. Biomim.* 7, DOI:10.1088/1748-3182/7/1/015002, (2012)
- [2] O. Speck, F. Antony & T. Speck, *Das bionische Versprechen*, In: *Prototype Nature* (eds. A. Bernotat & J. Bertling), (2016) [in press]
- [3] T. Speck, J. Knippers & O. Speck, *Archit. Design*, 85/5: 34-39 [Special Issue 'Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational'], (2015)
- [4] T. Speck, *Approaches to Bio-inspiration in Novel Architecture*, In: *Built to Grow - Blending architecture and biology* (eds. B. Imhof & P. Gruber), 145-149, Birkhäuser Verlag, Basel (2015)
- [5] T. Speck & O. Speck, *Naturwiss. Rundschau*, 68/10: 22/510-35/523, (2015) [Beirichtsheft der Gesellschaft der Deutschen Naturforscher und Ärzte GDNÄ], (2015)
- [6] S. Poppinga, T. Haushahn, M. Warnke, T. Masselter & T. Speck, *PLoS ONE*, 10(10): e0138495 DOI:10.1371/journal.pone.0138495, (2015)
- [7] S. Schmier, S. Eckert, V. Gudenus, M. Caliaro, G. Bauer & T. Speck, *Mechanical Tests with Mycelium Stabilized Paper-Straw-Grain-Samples*, In: *Built to Grow - Blending architecture and biology* (eds. B. Imhof & P. Gruber), 99-103, Birkhäuser Verlag, Basel (2015)
- [8] L. Hesse, T. Speck, B. Imhof, C. Yönetim & J. Leupold, *Magnetic resonance imaging of the three dimensional growth of the slime mould *Physarum polycephalum**, In: *Built to Grow - Blending architecture and biology* (eds. B. Imhof & P. Gruber), 90-93, Birkhäuser Verlag, Basel (2015)

One year of „SFB-Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture

T. Speck

Plant Biomechanics Group Freiburg, 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“

Seven of the eleven projects of the Cooperative Research Center 141 (CRC 141), running at the University of Freiburg, are located since 1st October 2014 at the Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT). After having succeeded in filling in 2014 nearly all PhD- and Postdoc-positions, in the reporting year 2015 the scientific projects of the CRR 141 have been run by natural scientists (biologists, physicists, chemists, geologists), material scientists, engineers and architects on an interdisciplinary basis. In addition to the studies performed by the scientists in their respective special fields of research, the first year was also used to establish the interdisciplinary collaboration and to develop a “common scientific language” that is understood by all project partners in the R&D-projects [1]. Essential for establishing such an interdisciplinary cooperation are, in addition to regular meetings of the partners in the specific projects, especially the bimonthly “SFB-TRR 141 Workshops”. They rotate between the partner universities of the CRC 141 in Stuttgart, Freiburg or Tübingen, and are organized by the re-

spective working groups being members of the CRC 141.

In 2015 the “CRC 141 Workshops” took place five times dealing with focus on different topics.

The 1st “CRC 141 Workshop” was organized by Profs. Klaus Nickel, James Nebelsick und Oliver Betz together with their staff and took place on 30th January 2015 at the Institute for Applied Mineralogy at the University of Tübingen.

The 2nd “CRC 141 Workshop” was organized by Dr. Olga Speck and the collaborators of the C01-Project “The Biomimetic Promise: Natural solutions as Concept Generators for Sustainable Technology Development in the Construction Sector”. It took place on 20th March 2015 in the Institute of Biology I, as the research building of the Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT) was not finished at that time. Main topic of the workshop was „Biomimetics and Sustainable Development” [2]. The attendant CRC 141 members filled in a survey concerning this topic and participated in an interactive workshop (Fig. 1). In addition a talk about “The Biomimetic Promise” was given by Dr. Olga Speck (Fig. 2).

The 3rd “CRC 141 Workshop” was hosted at the Stuttgart State Museum of Natural History and organized by PD Dr. Anita Roth-Nebelsick and her collaborators.

The 4th “CRC 141 Workshop” took place on 10th July 2015 at the Institute for Applied Mineralogy at the University of Tübingen and was organized again by Profs. Klaus Nickel, James Nebelsick and Oliver Betz and their staff.

On 18th of September the 5th “CRC 141 Workshop” was organized by Dr. Renate Reiter und Prof. Günter Reiter and was hosted at the newly constructed FIT building at the technical campus of the University of Freiburg (Fig. 3). It was one of the first larger scientific meetings at the Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT). This new facility provides a synergetic platform for the research of the CRC 141. Main focus was laid on presenting results of the CRC-projects B02 „Evolutionary processes driving biological variation and diversity as models for exploratory digital design tools in architecture“ and A09 „Analysis of *Physcomitrella* chloroplasts to reveal adaptation principles leading to structural stability at the nano-scale“ which run under participation of scientists from the University of Freiburg plus the project B05 “Structural design with biological methods: optimality, multi-functionality and robustness”. The newest results of these projects were presented and discussed at length. Afterwards Dr. Josef Madl (F-BIOSS) gave an introduction to Atomic Force Microscopy, and interested participants could join a demonstration of AFM measurements given by Dr. Yi Thomann (Fig. 4) or could visit some laboratories guided by the administrative manager of the FIT Dr. Stephanie Meisen.

Highlight of the year 2015 was the „1st Conference Sonderforschungsbereich Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures“, that took place at 12th and 13th November in the conference rooms of the „Museum am Löwentor“ in Stuttgart (Fig. 5). During the conference 22 lectures dealing with „Biomimetics and Architecture“ were presented, 6 by invited international experts and 16 by members of the CRC 141.

The conference comprised session on „Simulation and Modelling“ (4 lectures), „Design and Construction“ (9 lectures), „Botany and Biodiversity“ (5 lectures) as well as “Zoology, Paleontology and Mineralogy” (4 lectures).

Already in the first year of the CRC 141 five publications were published in peer reviewed journals as well as five contributions in scientific books and two in conference proceeding volumes plus ten short communications (miscellaneous) [see 4-8]. Moreover scientists of the CRC 141 were active in public outreach and gave nine interviews published in various print media dealing with topics studied in the framework of the CRC 141. A detailed and updated list of publications and public outreach can be found under www.trr141.de. Here also a detailed description of the structure of CRC 141, the topics of the various projects and the portraits of the scientists involved is given.

Fig. 1: CRC 141 members during the interactive workshop „Biomimetics and Sustainable Development“. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: Dr. Olga Speck presenting her talk on “The Biomimetic Promise“. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 3: CRC 141 members during a discussion phase in the foyer of the Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT). © Antonia Duma, FIT

Fig. 4: Demonstration of AFM measurements given by Dr. Yi Thomann in the new FIT laboratories. © Renate Reiter, Experimental Polymer Physics University of Freiburg

Fig. 5: Flyer of the 1st Conference Sonderforschungsbereich Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures. © CRC 141

IRTG 1642

Internationales Graduiertenkolleg (IRTG) "Weiche Materie: Von molekularen Kräften zu neuen Materialien"

(engl. Titel: „Concepts for the Design of Functional Materials“)

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

DFG Förderung 2010-2019

Die „Weiche Materie“ stellt zweifellos eine wachsende und interdisziplinäre Richtung in Forschung und Lehre dar, die Chemiker/-innen, Physiker/-innen, Biologen/-innen und Ingenieure/-innen gleichermaßen fasziniert. Zum Teil beruht dieses Interesse auf den erstaunlichen Eigenschaften weicher Materialien, z. B. deren Fähigkeit auf äußere Reize zu reagieren. Selbst schwache Stimuli können erhebliche Veränderungen im Verhalten dieser Materialien wegen ihrer Weichheit und mesoskopischen Strukturierung hervorrufen. Während die Weichheit eine Folge der relativ schwachen Wechselwirkungen – vergleichbar thermischer Fluktuationen – zwischen den Bausteinen ist, ist die Strukturierung auf mesoskopischen Längenskalen oft eine Konsequenz von Selbstorganisationsprozessen, d. h. der spontanen Bildung geordneter Bereiche, die sehr viel größer als die einzelnen Moleküle sein können. Die moderne Forschung nutzt diese Merkmale bereits bei der Herstellung von innovativen Materialien. Oft bestehen diese Systeme aus mehreren Komponenten, haben vielfältige Grenzflächen und weisen komplexe effektive

Wechselwirkungen auf. Es ist eine große Herausforderung, die Synergien zwischen den steuernden Faktoren zu verstehen, damit deren Einfluss auf die Materialeigenschaften vorhersagbar und kontrollierbar wird. Fortschritte in dieser Richtung sollten es erlauben, neue Materialien mit hohem Maß an Funktionalität herzustellen, die denen in der Natur vorkommenden nahekommen.

Das Ziel des Internationalen Graduiertenkollegs (IRTG) "Weiche Materie: Von molekularen Kräften zu neuen Materialien" zwischen den Universitäten Freiburg und Strasbourg ist es, die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses in diesem Gebiet der Materialforschung zu fördern (Abb. 1).

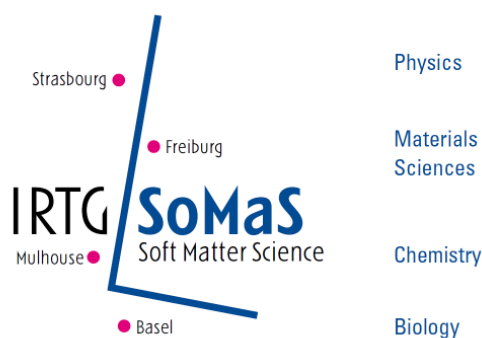


Abb. 1: IRTG-SoMaS. © IRTG-SoMaS
www.softmattergraduate.uni-freiburg.de

Die erste Förderperiode des IRTG lief vom Oktober 2010 bis März 2015. Das Forschungsprogramm der zweiten Förderperiode, die im April 2015 gestartet hat, umfasst drei eng miteinander verbundene Themen mit insgesamt 19 Dissertationsprojekten, die ein breites Spektrum verschiedener Aspekte im Bereich weicher Materie repräsentieren. Im Jahr 2015 forschen mehr als 24 Doktorand/-innen in diesen bilateralen Projekten, in denen sie jeweils eine deut-

sche und französische Betreuerin oder einen deutschen und französischen Betreuer haben. Aufenthalte an den Partnerinstituten, die durch die geographische Nähe der Standorte begünstigt sind, spielen eine zentrale Rolle in der Doktorandenausbildung. Über die Forschung hinaus wird die Ausbildung ergänzt durch ein abgestimmtes Qualifizierungsprogramm mit internen Workshops, Sommer-schulen und Vorträgen von Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftlern. Förderung von Soft Skills und Sprachkenntnissen wird ebenso großgeschrieben. An dieser Stelle ist auch wichtig zu erwähnen, dass aus dem IRTG ein zweijähriges internationales Masterprogramm (IM-PolyS) in "Polymer Science" entstanden ist, welches bereits seit zwei Jahren erfolgreich läuft und mit Studierenden aus insgesamt 15 Ländern besetzt ist und diese strukturiert an die Promotionsphase heranführt.

Das Forschungsprogramm der zweiten Förderperiode wurde auf der Basis der in der ersten Förderphase gewonnenen Erfahrungen konzipiert. Es wird die gleiche interdisziplinäre Strategie wie bisher verfolgt, aber aus Dissertationsprojekten bestehen, die thematisch noch enger miteinander verknüpft sind, mit dem Ziel, die Zusammenarbeit zwischen den Projekten weiter zu verbessern.

Außerdem werden Promovierende ermutigt, an internationalen Konferenzen teilzunehmen und ihrem projekt dienliche Forschungsaufenthalte nicht nur in Partner-, sondern auch in Drittländern zu absolvieren, um somit den wissenschaftlichen Austausch zu fördern. Darüber hinaus werden Veranstaltungen gefördert, die verschiedene Karriereperspektiven für Absolvent/innen aufzeigen. In Planung ist auch ein Workshop in Dritt-

mitteleinwerbung als Vorbereitung auf mehr Selbstständigkeit in der wissenschaftlichen Laufbahn. Das Kolleg strebt besonders an, die Chancengleichheit von Frauen und die Vereinbarkeit von Wissenschaft und Familie zu fördern und kooperiert mit dem KITE-Mentoring sowie dem Familienservice der Universität Freiburg.

Das IRTG ist eingebettet in den Eucor-European Campus, den grenzüberschreitenden Universitätsverbund der trinationalen Metropolregion Oberrhein.

Auch wenn das Programm vornehmlich auf Grundlagenforschung ausgerichtet ist ("Concepts"), hat es das klare Ziel, zur Entwicklung von funktionellen Materialien für zukünftige Anwendungen beizutragen. Um diese zentrale Forschungsidee realisieren zu können, ist das Forschungsprogramm aus den nachfolgend erläuterten Gründen um drei Themenbereiche („Säulen“) herum strukturiert (Abb. 2):

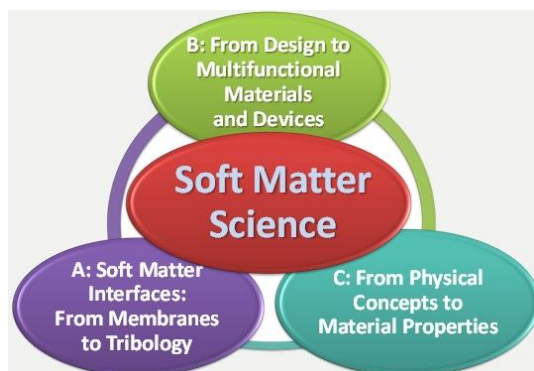


Abb. 2: Die drei Themenbereiche des IRTG-SoMaS (A: Soft matter interfaces: From membranes to tribology, B: From design to multifunctional materials and devices, C: From physical concepts to material properties). © IRTG-SoMaS

Die Untersuchung fortschrittlicher Funktionswerkstoffe auf Basis von Soft Mat-

ter-Systemen geht einher mit dem Verstehen von (Selbst-) Organisationsprozessen und den Auswirkungen von Grenzflächen. Typischerweise bestehen die untersuchten Materialien aus speziell entwickelten Molekülen, die oft über mehrere funktionelle Merkmale verfügen und dafür programmiert sind, sich in hierarchische Strukturen zusammenzufügen. Die Eigenschaften vieler Soft Matter-Systeme sind nicht nur durch das thermische Gleichgewicht vorgegeben, sie sind oft abhängig vom Herstellungs- oder Verarbeitungsprozess. Somit existieren physikalische Wege, die es erlauben, durch Lenken von Organisationsprozessen Eigenschaften zu optimieren, bspw. über die Kontrolle von Grenzflächenstrukturen oder Formulierungen.

Die wissenschaftlichen Fragen aller drei Themenbereiche sind somit eng miteinander verknüpft und haben außerdem zahlreiche methodische Überschneidungen. Der Erfolg des IRTG beruht auf einem vernetzten und interdisziplinären Forschungsprogramm, das komplementäres Wissen aus Physik, Chemie, Biologie, Material- und Ingenieurwissenschaften erfordert und zusammenbringt. Das IRTG strebt auf diese Weise die Entwicklung von Konzepten für die Gestaltung fortschrittlicher Soft Matter-Materialien an.

Das Forschungsprogramm des IRTG ermöglicht somit den Zugang zu einer hochspezialisierten Ausbildung, garantiert fächerübergreifenden Wissenstransfer und fördert die Verbundforschung in Teams, die über komplementäres Fachwissen auf internationalem Niveau verfügen. Dies ist seit 2015 verstärkt durch die Einbeziehung der Mercator Fellows, die mit ihrer Fachexpertise das Kolleg langjährig begleiten und somit neue Aspekte einführen, wertvolle Vor-

schläge geben und die internationale Visibilität der wissenschaftlichen Projekte erhöhen.

Stand Januar 2016:

- 2 Sprecher
- 27 Reguläre und assoziierte Promovierende in laufenden Forschungsprojekten
- 27 Dozierende
- 17 Kooperationspartner
- 2 Mercator Fellows
- 1 Postdoc
- 7 Wissenschaftliche Hilfskräfte
- 1 Koordinatorin
- 1 Mitarbeiterin Öffentlichkeitsarbeit (Teilzeit)

Hauptveranstaltungen in 2015:

- 2nd Round Kick-Off Workshop, March 5-6, 2015, Schluchsee, Germany
- 5th Annual Summer School "Concepts and Methods in Soft Matter", July 5-10, Mittelwihr, France
- Fall Internal Workshop, October 5-6, 2015, Breisach, Germany
- 2nd International Workshop on Dendrimers and Hyperbranched Polymers, November 23-24, 2015, Freiburg, Germany

International Research Training Group (IRTG) "Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials"

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

DFG funding 2010-2019

Soft matter science is without any doubt a growing and interdisciplinary field of research, attracting equal attention from chemists, physicists, biologists, and engineers. 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 objective of the International Research Training Group (IRTG) "Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials" between the Uni-

versities of Freiburg and Strasbourg is to promote graduate education and scientific exchange in this modern field of research on soft matter materials (Fig. 1).

The first funding period of the IRTG was running from October 2010 to March 2015. The research programme of the second funding period – that started in April 2015 – consists of three interconnected themes with 19 PhD projects in total, representing a large spectrum of diverse aspects of soft matter science. In 2015, more than 24 PhD students are working in these bilateral projects, where they have 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. Training in Soft Skills and acquisition of the language of the host country are equally promoted. On this occasion it is noteworthy to mention that the IRTG has established in parallel a two-year international Master programme (IM-PolyS) in “Polymer Science“. This Master programme has been successfully running for two years already and currently counts students from 15 different nations, and prepares them in a structured way for a PhD track.

The PhD research programme of the second funding period has been designed by drawing on the experience gained during the first funding phase. It will follow the same interdisciplinary strategy as before, but consists of PhD projects that are more strongly interlinked to further enhance collaborations.

In addition, doctoral students are encouraged to attend international conferences and perform research stays beneficial to their project not only in the partner but also in the third countries so as to promote scientific exchange. Moreover, career events are organized offering a variety of perspectives for graduates. A workshop in acquiring third party funding as preparation for more independence in an academic career is being planned. The IRTG is highly interested in promoting equal opportunities and compatibility of family and career and is cooperating with the KITE-Mentoring and the Family Service of Freiburg University.

The IRTG is embedded in the Eucor-European Campus, a University alliance aiming at cross border cooperation in higher education and research in the Upper Rhine Trinational Metropolitan Region.

Even though the programme is mainly engaged in fundamental research (“Concepts”), it has a clear thrust 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 (“pillars”; Fig. 2) due to the following reasons:

A: Soft matter interfaces: From membranes to tribology

B: From design to multifunctional materials and devices

C: From physical concepts to material properties

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 also multiple methodological overlap. Success of the IRTG rests upon an interconnected and interdisciplinary research programme which requires and brings together complementary knowledge from physics, chemistry, materials science and engineering, and biology. In this way, the IRTG aims at developing concepts for the design of advanced soft matter materials.

The IRTG's research programme will thus be providing highly specialized training, assure cross-disciplinary transfer of knowledge, and promote collaborative research in teams possessing complementary expertise at an international level. Since 2015 this is further increased by integrating Mercator Fellows to accompany the IRTG with their scientific expertise in the long term. This way, they introduce new aspects, provide valuable input and at the same time enhance international visibility of the running research projects.

Status Quo January 2016:

2 Spokespersons
 27 Regular and associated doctoral researchers in ongoing projects
 27 Principal investigators
 17 Collaborators
 2 Mercator Fellows
 1 Postdoc
 7 Student assistants
 1 Coordinator
 1 Public Relations Officer (part-time)

Main events in 2015:

2nd Round Kick-Off Workshop, March 5-6, 2015, Schluchsee, Germany
 5th Annual Summer School "Concepts and Methods in Soft Matter", July 5-10, Mittelwihr, France
 Fall Internal Workshop, October 5-6, 2015, Breisach, Germany
 2nd International Workshop on Dendrimers and Hyperbranched Polymers, November 23-24, 2015, Freiburg, Germany

Fig. 1: IRTG-SoMaS. © IRTG-SoMaS
www.softmattergraduate.uni-freiburg.de

Fig. 2: Three thematic areas of IRTG-SoMaS. © IRTG-SoMaS

ERC STARTING GRANT “REGENERATE“

Selbstregenerierende Antimikrobielle Oberflächen – Entwicklung einer Technologieplattform für Neue Materialien und Devices

Franziska Dorner¹, Esther K. Riga¹,
Karen Lienkamp¹

¹Bioactive Polymer Synthesis and Surface Engineering Gruppe, Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) und Freiburger Zentrum für Interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Projektförderung: Europäischer Forschungsrat (ERC) Starting Grant, Projekt-Kürzel: REGENERATE

Selbstheilend, selbstreinigend, selbstreparierend... die zahlreichen Mechanismen, mit denen natürliche Materialien auf externe Stimuli reagieren, um ihre Eigenschaften wiederherzustellen, sind faszinierend. Das wahrscheinlich bekannteste Beispiel, das selbstreinigende Lotusblatt, hat inzwischen die Entwicklung vieler technischer Materialien mit ähnlichen Eigenschaften angeregt, die teilweise die des natürlichen Vorbilds noch übertreffen.

In unseren Arbeiten zu antimikrobiellen Polymeroberflächen [1] hatten wir folgendes Problem: kontaktaktive antimikrobielle Polymeroberflächen brauchen kationische Ladungen, damit negativ geladene Bakterien auf ihnen haften bleiben – ungefähr wie eine Fliege auf einem klebrigen Fliegenfänger. Sobald das Bakterium auf solch einem antimikrobiellen Material adhärert, kann die Polymeroberfläche mit dem Bakterium so wechselwirken, dass es dabei eingeht. [1,2]

Leider haften aber nicht nur Bakterien auf diesen Oberflächen. Viele Biomoleküle und vor allem die Überbleibsel der abgetöteten Bakterien sind ebenfalls negativ geladen. Wenn diese Moleküle die antimikrobielle Polymeroberfläche kontaktieren, bleiben sie also ebenfalls hängen. Irgendwann ist die Oberfläche komplett bedeckt, so dass ihre ursprüngliche antimikrobielle Ausstattung maskiert ist. Neue Bakterien können sich auf diesem Belag ansiedeln, sich dort vermehren und einen sogenannten „Biofilm“ bilden. Biofilme schützen Bakterien nicht nur vor Antibiotika, sondern auch vor Angriffen des Immunsystems. Sie bilden außerdem ein Reservoir, durch das pathogene Bakterien weiter im Organismus verbreitet werden können.[3] Bildet sich der Biofilm auf der Oberfläche eines Medizinprodukts, z.B. eines Katheters, wird aus dem ehemals lebensrettenden Gerät eine tödliche Gefahr.

Leider ist es deutlich aufwändiger, ein kontaminiertes medizinisches Gerät zu ersetzen, als einen mit Fliegen zusetzten Fliegenfänger. Daher sind Materialien, die in der Lage sind, ihre antimikrobiellen Eigenschaften *selbständig zu regenerieren*, ein attraktives Forschungsziel. Potentielle Anwendungen hierfür wären zum Beispiel Urinkatheter, die sich durch Biofilmbildung im Lumen zusetzen, und daher öfter gewechselt werden müssen.

Die Inspiration für unser selbstregenerierendes Material haben wir von der Natur genommen. Wenn natürliche Oberflächen versagen, lässt der zugehörige Organismus eine neue Oberfläche wachsen. Bei Haut wird das Gewebe von unten regeneriert, während die oberste Hornschicht kontinuierlich abgeworfen wird. Dies ist besonders eindrucksvoll sichtbar, wenn Reptilien sich

häuten. Unser Ziel ist, ein Material herzustellen, das seine versagende antimikrobielle Oberfläche abwerfen kann, genauso wie das Reptil, wodurch eine neue funktionelle Oberfläche freigelegt wird. Dies ist in Abbildung 1 illustriert. Unser Zielmaterial ist ein Stapel aus vielen dünnen Polymerfilmen, eine sogenannte Polymermultilage. Dieser Stapel ist aus abbaubare Polymerlagen (blau) und antimikrobiellen Polymerlagen (rot) aufgebaut, die abwechselnd aufgetragen wurden. Während die oberste Schicht kontaminiert wird, baut sich die degradierbare Schicht darunter bereits ab. Dies schwächt die Adhäsionskräfte zur nächsten antimikrobiellen Schicht, so dass die beiden obersten Schichten (die kontaminierte antimikrobielle und die abbaubare) sich ablösen, und eine frische antimikrobielle Schicht freigelegt wird.

Anstatt also nur zu versuchen, "bessere" (z. B. weniger adhäsive) antimikrobielle Oberflächen herzustellen, verfolgen wir ein fundamental anderes Materialdesign. Indem wir definierte Lagen ablösen, anstatt einfach ein abbaubares antimikrobielles Material zu entwickeln, vermeiden wir außerdem die Bildung von Kratern an der Polymeroberfläche, die sonst für die Adhäsion von Bakterien eher förderlich wären. So sorgen wir dafür, dass die entstehende Polymerschicht stets homogen und glatt ist.

Neben potentiellen Anwendungen im medizinischen Bereich ist das Problem, ob und wie man eine Polymermultilage gezielt wieder auseinandernehmen kann, intrinsisch interessant. Ansätze, die im Zusammenhang mit Drug Delivery-Arbeiten entstanden, haben dies bisher nicht erreicht.[4] Das grundlegende wissenschaftliche Problem ist, eine Grenzfläche von adhäsiv auf nicht-

adhäsiv zu „schalten“. Der Weg, den wir in unserem Konzept gewählt haben, lehnt sich an die Fabrikationsmethoden aus der Mikrosystemtechnik an, wo wasserlösliche Opferschichten verwendet werden.[5] Anstatt zu versuchen, die Adhäsionskräfte zwischen zwei benachbarten Schichten aufzuheben, löst sich unsere degradierbare Zwischenschicht auf. Dadurch, dass diese Schicht abbaubar und nicht nur auflösbar ist, können wir aber die Kinetik dieses Prozesses einstellen.

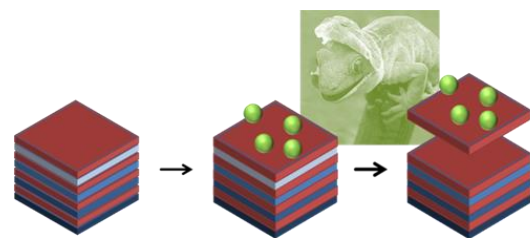


Abb. 1: Konzept des Projekts: Das Zielmaterial ist eine Polymermultilage, die aus alternierenden antimikrobiellen und abbaubaren Schichten besteht. Wenn die oberste antimikrobielle (rot) Schicht kontaminiert ist, löst sie sich ab - wie bei einem Reptil, das sich häutet. Dies ist durch den Abbau der darunterliegenden abbaubaren Schicht (hellblau) möglich. Die Kontamination wird dadurch entfernt, und eine neue antimikrobielle Polymerschicht wird freigelegt. Aufgrund der unterschiedlichen Abbauraten der degradierbaren Polymere (verschiedene Blautöne) kann dieser Prozess sequentiell erfolgen. © Karen Lienkamp

Wir haben bereits einen Machbarkeitsnachweis für das obige Konzept geliefert. Mit einem Dreischichtsystem aus zwei antimikrobiellen Lagen und einer degradierbaren Zwischenschicht konnten wir zeigen, dass wir die antimikrobielle Funktionalität durch Auflösen der degradierbaren Zwischenschicht einmal erneuern können. Die dabei freigelegte antimikrobielle Schicht war voll funktionsfähig.[6]

Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Herstellung von abbaubaren Schichten mit verschiedenen Abbaugeschwindigkeiten konzentrieren. Außerdem wollen wir eine Art „Werkzeugkasten“ zusammenstellen, der beschreibt, was nötig ist, um das selektive und sequenzielle Ablösen von Polymermultilagern zu ermöglichen, so dass diese Technologie nicht nur für den antimikrobiellen Bereich anwendbar ist, sondern auch auf andere Gebiete übertragen werden kann.

Literatur

[1] Zou, P.; Laird, D.; Riga, E. K.; Deng, Z.; Perez-Hernandez, H.-R.; Guevara-Solarte, D. L.; Steinberg, T.; Al-Ahmad, A.; Lienkamp, K. Antimicrobial and Cell-Compatible Surface-attached Polymer Networks – How the Correlation of Chemical Structure to Physical And Biological Data Leads to a Modified Mechanism of Action. *Journal of Materials Chemistry B* 2015, 3, 6224-6238

[2] Siedenbiedel, F.; Tiller, J. C. Antimicrobial polymers in solution and on surfaces: overview and functional principles. *Polymers* 2012, 4 (1), 46-71.

[3] Díaz, C.; Miñán, A.; Schilardi, P. L.; Fernández Lorenzo de Mele, M. Synergistic antimicrobial effect against early biofilm formation: micropatterned surface plus antibiotic treatment. *International Journal of Antimicrobial Agents* 2012, 40 (3), 221-226.

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

[5] Ziaie, B.; Baldi, A.; Lei, M.; Gu, Y.; Siegel, R. A., Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews* 2004, 56 (2), 145-172.

[6] Franziska Dorner; David Boschert; Alexandra Schneider; Wibke Hartleb; Ali Al-Ahmad; Lienkamp, K. Toward Self-regenerating Antimicrobial Polymer Surfaces. *ACS Macro Lett.* 2015, 4, 1337-1340.

Self-regenerating Antimicrobial Surfaces – Towards a Technology Platform for New Materials and Devices

Franziska Dorner¹, Esther K. Riga¹,
Karen Lienkamp¹

¹Bioactive 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

Self-healing, self-cleaning, self-repairing... the numerous ways in which many natural materials respond to external stimuli and restore their initial properties are truly fascinating. The probably most famous example, the self-cleaning lotus leaf, has stimulated the development of many technical materials that have similar properties, or even outperform the natural archetype.

In our research on antimicrobial polymer surfaces,[1] we were challenged with the following problem: contact-active antimicrobial polymer surface need cationic charges, so that negatively charged bacteria adhere to them – similar to a bug on a sticky fly strip. Once adhered, the antimicrobial material further interacts with the bacterial envelope, which eventually causes the death of the bacteria.[1,2] Unfortunately, cationic antimicrobial surface do not only “trap” bacteria this way. Many biomolecules and particularly the debris of the dead bacteria is also negatively charged. Once in contact with the antimicrobial surfaces, these molecules get also stuck. Eventually, the surface is fully covered, and the original antimicrobial function is masked. Living bacteria can now settle on that

layer, and from there proliferate and form a biofilm. Biofilms are known to protect bacteria not only against antibiotic drugs, but also against action of the immune system. Additionally, they serve as a reservoir for further distribution of bacteria in an organism.[3] If all of the above happens on the surface of a biomedical device, for example a catheter, the once life-saving surface coating of that device fails, and becomes a life-threatening hazard.

Unfortunately, the replacement of a contaminated medical device not as straight-forward as exchanging bug-covered fly strips. Therefore, a material able to *self-regenerate* failing antimicrobial surface properties would be highly desirable. In practice, such a material could for examples prolong the life-time of urinary catheters, which often have to be changed because their lumen becomes congested by bacterial biofilms.

We took inspiration from nature to develop a material that can perform the desired self-regeneration. When a natural surface fails, the parent organism usually replaces it by a new one. In skin, this is achieved by regenerating the tissue from underneath, while the topmost hard skin layer is shed. This is particularly apparent when reptiles shed their skin, which was the inspiration for our project. Our aim is to make a material that can shed its entire defective antimicrobial layer, like a reptile shedding its skin, and present a clean, functional one.

This concept is illustrated in Figure 1. Our target material consists of a multi-stack of thin polymer films. Degradable layers (shades of blue) are placed between antimicrobial polymer layers (red). While the topmost antimicrobial layer

becomes contaminated, the degradable layer underneath disintegrates. This weakens the adhesive forces to the next antimicrobial layer. Eventually, the top two layers (the contaminated antimicrobial one and the degradable) are shed, and a new antimicrobial layer is presented.

Thus, instead of just trying to make “better”, less adhesive antimicrobial surfaces, in our approach we propose a fundamental change of the material's design. Also, by shedding defined layers, instead of just eroding an antimicrobial surface, the emerging functional layer stays homogeneous and has defined properties. Cavities or craters, which might otherwise promote bacterial adhesion, are thus avoided.

Besides potential applications in the medical field, the problem how to disassemble a polymer thin-film multi-stack is fundamentally interesting, because it has so far not been solved, although there have been attempts to so this in the context of drug delivery.[4] The underlying scientific problem is how to make a previously adhesive interface non-adhesive. The work-around we chose was based on the concept of sacrificial layers used in the fabrication of microsystems.[5] Instead of trying to break the adhesive forces between two adjacent functional layers, we sandwiched the degradable layer in between. However, unlike sacrificial layers, which are removed by dissolving them, we used degradable polymer layers. This allows us to control the degradation process, and thereby the kinetics of layer shedding.

We have already established proof-of-concept for our idea using a three layer system, where we demonstrated that we

can successfully shed the top antimicrobial layer once by degrading the layer underneath. After that shedding event, the emerging antimicrobial layer was fully functional.[6] Upcoming work will focus on the synthesis of degradable layers with different degradation kinetics. Additionally, we want to put together a tool-box that describes what is needed to achieve selective and sequential layer shedding of polymer thin film multi-stacks, so that the technology is not only applicable to antimicrobial polymers, but can be generalized to other functionalities.

Fig. 1: Project concept. The target material is a polymer thin film multi-stack consisting of alternating degradable and antimicrobial layers. When the top antimicrobial layer (red) is contaminated, it is shed (like a reptile that sheds its skin) by degradation of the polymer layer underneath (light blue). This removes the contamination and reveals a fresh antimicrobial polymer layer. Because of the different degradation rates of the degradable polymers (different shades of blue), the shedding can be sequential. © Karen Lienkamp

FIT-KOLLOQUIUM 2015

Programm

3. Internes FIT-Kolloquium

Freitag, den 06.02.2015 ab 14:00 Uhr im Seminarraum B des FMFs

- | | |
|-----------|--|
| 14:00 Uhr | Begrüßung durch den Geschäftsführenden Direktor Rolf Mülhaupt |
| 14:10 Uhr | Thomas Speck
Der SFB-Transregio TRR 141: Biologisches Design und integrative Strukturen – Analyse, Simulation und Übertragung in die Architektur |
| 14:18 Uhr | Simon Thiele (stellvertretend für Roland Zengerle)
Direct Printing of Proton Exchange Membranes Enabling High Performance Hydrogen Fuel Cells |
| 14:26 Uhr | Stefan Glunz
Hybrid-Solarzellen – Hohe Leistungsdichten durch die Kombination von Materialsystemen |
| 14:34 Uhr | Ralf Reski
Moos Molekulare Bionik MMB |
| 14:42 Uhr | Georg Bauer
Pflanzen und Tiere als Ideengeber für Energiedissipation in lasttragenden Systemen und Fassaden und Skalierungseigenschaften von hochporösen biologischen und biomimetischen Konstruktionen |
| 14:50 Uhr | Michael Sommer
Dynamic Functional Materials Based on Spiropyran |
| 14:58 Uhr | Winfried Römer
Synthetische Glykobiologie – neue Strategien zur Herstellung und Funktionalisierung von biologischen Oberflächen (Proto-Zelle und Proto-Gewebe) |
| 15:06 Uhr | Marco Caliaro (stellvertretend für Olga Speck)
Inspiriert durch Pflanzen und Tiere: Aktiv bewegte, stabförmige Strukturen mit adaptiver Steifigkeit und gelenkfreier, stufenloser Beweglichkeit |
| 15:15 Uhr | Volker Knecht
Modeling membranes with complex lipid compositions |
| 15:22 Uhr | Marc Thielen
Kinematik planarer, gekrümmter und gewellter Pflanzenstrukturen als Konzeptgeneratoren für bewegliche Strukturen in der Architektur |
| 15:30 Uhr | Holger Bohn
Adhäsion und Reibung auf mikrostrukturierten Oberflächen: Inspiration von Insekt-Pflanze-Interaktionen |
| 15:38 Uhr | Jürgen Rühle
Molekulare Analyse mechano biologischer Reaktionen von Stammzellen - μ MSC |
| 15:46 Uhr | Linnea Hesse (stellvertretend für Tom Masselter)
Verzweigungen und Achsen von ausgewählten Pflanzenarten als Ideengeber für hoch belastbare Verbindungen in verzweigten Baustrukturen |
| 15:54 Uhr | Joanna Urban (stellvertretend für Thorsten Hugel)
Biomechanics of articular cartilage – friction and wear at the micro-scale |
| 16:02 Uhr | Anayancy Osorio
Elektrophoretisch abgeschiedene Nano-hydroxyapatit / Chitosan Multischichten und gradiente Hydrogele für osteochondrale Tissue Engineering |

PUBLIKATIONEN / PUBLICATIONS

BACH, D.; SCHMICH, F.; MASSELTHER, T.; SPECK, T. (2015): A review of selected pumping systems in nature and engineering - potential biomimetic concepts for improving displacement pumps and pulsation damping. – *Bioinspiration and Biomimetics*, 10. DOI:10.1088/1748-3190/10/5/051001

BAAKEN, G.; HALIMEH, I.; BACRI, L.; PELTA, J.; OUKHALED, A.; BEHRENDTS, J.C. (2015): High-Resolution Size-Discrimination of Single Nonionic Synthetic Polymers with a Highly Charged Biological Nanopore. – *ACS Nano*, 9(6), 6443-6449.

<http://doi.org/10.1021/acsnano.5b02096>

BAUER, G.; SCHMIER, S.; THIELEN, M.; SPECK, T. (2015): Energy dissipation in plants – from puncture resistant seed coats to impact resistant tree barks. – In: *The 8th Plant Biomechanics Conference*, Nagoya University, 190-195. Nagoya, Japan.

BOHN, H.F.; GÜNTHER, F.; SCHMIER, S.; FINK, S.; SPECK, T. (2015): A passionate climber: Functional morphology and biomechanics of the adhesive tendrils in *Passiflora discophora*. – In: *The 8th Plant Biomechanics Conference*, Nagoya University, 208-212. Nagoya, Japan

BOHN, H.F.; GÜNTHER, F.; FINK, S.; SPECK, T. (2015): A passionate free climber: Structural development and functional morphology of the adhesive tendrils in *Passiflora discophora*. – *International Journal of Plant Sciences*, 176: 294-305.

BROLL, S.; NÜBLING, F.; LUZIO, A.; LENTZAS, D.; KOMBER, H.; CAIRONI, M.; SOMMER, M. (2015): Defect-analysis of high electron mobility diketopyrrolopyrrole copolymers made by direct arylation polycondensation. – *Macromolecules* 48: 7481-7488. DOI: 10.1021/acs.macromol.5b01843

BREITWIESER M.; KLINGELE, M.; BRITTON B.; HOLDCROFT, S.; ZENGERLE R.; THIELE, S. (2015): Improved Pt-utilization efficiency of low Pt-loading PEM fuel cell electrodes using direct membrane deposition. – *Electrochemistry Communications* 60: 168–171.

CALIARO, M.; SPECK, T.; SPECK, O. (2015): Adaptive Steifigkeit bei krautigen Pflanzen – Vorbild für die Technik. – In: *Bionik: Patente aus der Natur. Tagungsbeiträge zum 7. Bionik-Kongress in Bremen* (eds. Kesel, A.B.; Zehren, D.), 168-173. Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C), Bremen.

CEGNA, A.; PAUL-VICTOR, C.; SCHMAUDER, K.; SPECK, T.; SPECK, O. (2015): A Comparative Anatomical Study on Wound Reactions in Plant Stems. – In: *Bionik: Patente aus der Natur. Tagungsbeiträge zum 7. Bionik-Kongress in Bremen* (eds. Kesel, A.B.; Zehren, D.), 174-179. Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C), Bremen.

DEL RIO MARTINEZ, J.M.; ZAITSEVA, E.; PETERSEN, S.; BAAKEN, G.; BEHRENDTS, J.C. (2015): Automated Formation of Lipid Membrane Microarrays for Ionic Single-Molecule Sensing with Protein Nanopores. – *Small*, 11(1): 119.125. <http://doi.org/10.1002/smll.201402016>

DORNER, F.; BOSCHERT, D.; SCHNEIDER, A.; HARTLEB, W.; AL-AHMAD, A.; LIENKAMP, K. (2015): Toward Self-regenerating Antimicrobial Polymer Surfaces. *ACS Macro Lett.*, 4: 1337–1340.

HESSE, L.; SPECK, T.; IMHOF, B.; YÖNETIM, C.; LEUPOLD, J. (2015): Magnetic resonance imaging of the three dimensional growth of the slime mould *Physarum polycephalum*. – In: – In: Built to Grow - Blending architecture and biology (eds. Imhof, B; Gruber, P.), 90-93. Birkhäuser Verlag, Basel.

KLINGELE, M.; BREITWIESER M.; ZENGERLE, R.; THIELE, S. (2015): Direct deposition of proton exchange membranes enabling high performance hydrogen fuel cells. – J. Mater. Chem. A 3: 11239–11245.

KLINGELE, M.; ZENGERLE, R.; THIELE S. (2015): Quantification of artifacts in scanning electron microscopy tomography: Improving the reliability of calculated transport parameters in energy applications such as fuel cell and battery electrodes. – J. Power Sources: 275 852–859.

LOMBECK, F.; KOMBER, H.; SEPE, A.; FRIEND, R.H.; SOMMER, M.: Enhancing phase separation and photovoltaic performance of all-conjugated donor acceptor block copolymers with semifluorinated side chains. – Macromolecules 48: 7851-7860. DOI: 10.1021/acs.macromol.5b01845

MASSELTHER, T.; HESSE, L.; LEUPOLD, J.; SPENGLER, N.; KORVINK, J.G.; SPECK, T. (2015): Using MRI for analyzing the anatomy and biomechanics of monocotyledons. – In: The 8th Plant Biomechanics Conference, Nagoya University, 230-234. Nagoya, Japan.

MATSIDIK, R.; KOMBER, H.; SOMMER, M. (2015): Rational use of aromatic solvents for direct arylation polycondensation: C-H reactivity versus solvent quality. – ACS Macro Lett. 4: 1346-1350. DOI: 10.1021/acsmacrolett.5b00783

ROWE, N.P.; T. SPECK, T. (2015): Stem biomechanics, strength of attachment, and developmental plasticity of vines and lianas. – In: The Ecology of Lianas (eds. Schnitzer, S.; Bongers, F.; Burnham, R.; Putz, F.), 323-341. Wiley-Blackwell, Chichester. DOI: 10.1002/9781118392409.ch23 (invited publication) [electronic version 11'2014]

SCHMIER, S.; ECKERT, S.; GUDENUS, V.; CALIARO, M.; BAUER, G.; SPECK, T. (2015): Mechanical Tests with Mycelium Stabilized Paper-Straw-Grain-Samples. – In: Built to Grow - Blending architecture and biology (eds. Imhof, B; Gruber, P.), 99-103. Birkhäuser Verlag, Basel.

SPECK, O.; SPECK, T. (2015): Versiegeln, heilen, reparieren – Selbstreparatur in Natur und Technik. – Biologie in unserer Zeit / BIUZ, 45(1): 44-51.

SPECK, T. (2015): Approaches to Bio-inspiration in Novel Architecture. – In: Built to Grow - Blending architecture and biology (eds. Imhof, B; Gruber, P.), 145-149. Birkhäuser Verlag, Basel.

SPECK, T. (2015): Bio-inspiration by plants for construction technology and architecture: a short overview of recent work in the CRC 141. – In: The 8th Plant Biomechanics Conference, Nagoya University, 184-189. Nagoya, Japan.

SPECK, T. (2015): Fibres in nature and technology: Smart materials and structures inspired by biology. / Fasern in Natur und Technik: Clevere Materialien und Strukturen nach dem Vorbild Biologie. – Proceedings of the International Textile Conferences Aachen-Dresden, 23pp. DWI, Aachen (electronically).

SPECK, T. (2015): Plants as Concept Generators: From the Botanic Garden to the Bio-Inspired Product. – Proceedings of the Nature Inspired Manufacturing Workshop, 29pp. University of Cambridge (electronically).

SPECK, T.; KNIPPERS, J.; SPECK, O. (2015): Self-x-materials and -structures in nature and technology: Bio-inspiration as driving force for technical innovation. – AD Architectural Design, 85/5: 34 – 39 [Special Issue 'Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational'] (invited publication)

SPECK, T.; SPECK, O. (2015): Bionik in Botanischen Gärten - eine Chance für Forschung, Lehre und Bildung. – In: M. Looß (ed.), 10 Jahre Grüne Schule Braunschweig, 26 -31. TU Braunschweig.

SPECK, T.; SPECK, O. (2015): Von der Klette zum Klettverschluss – Bionik oder wie wir von der Natur die Technik der Zukunft abschauen. – Naturwissenschaftliche Rundschau, 68/10: 22/510-35/523 [Berichtsheft der Gesellschaft der Deutschen Naturforscher und Ärzte GDNÄ].

VIERRATH, S.; GÜDER, F.; MENZEL, A.; HAGNER, M.; ZENGERLE, R.; ZACHARIAS, M.; THIELE, S. (2015): Enhancing the quality of the tomography of nanoporous materials for better understanding of polymer electrolyte fuel cell materials. – J. Power Sources 285: 413–417.

VIERRATH, S.; ZIELKE, L.; MORONI, R.; MONDON, A.; WHEELER, D.R.; ZENGERLE, R.; THIELE, S. (2015): Morphology of nanoporous carbon-binder domains in Li-ion batteries—A FIB-SEM study. Electrochemistry Communications 60: 176–179.

ZIELKE, L.; BARCHASZ, C.; WALUŚ, S.; ALLOIN, F.; LEPRÉTRE, J.-C.; SPETTL, A.; SCHMIDT, V.; HILGER, A.; MANKE, I.; BANHART, J.; ZENGERLE, R.; THIELE, S. (2015): Degradation of Li/S Battery Electrodes On 3D Current Collectors Studied Using X-ray Phase Contrast Tomography. – Sci. Rep. 5: 10921.

ZIELKE, L.; HUTZENLAUB, T.; WHEELER, D.R.; CHAO, C.-W.; MANKE, I.; HILGER, A.; PAUST, N.; ZENGERLE, R.; THIELE, S. (2015): Three-Phase Multiscale Modeling of a LiCoO₂ Cathode: Combining the Advantages of FIB–SEM Imaging and X-Ray Tomography. – Adv. Energy Mater. 5.

IMPRESSUM

Das Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT)

Redaktion: Dr. Olga Speck

Druck: Druckerei der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

