



# Report 2014

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



REPORT

2014

FIT

FREIBURGER ZENTRUM FÜR  
INTERAKTIVE WERKSTOFFE UND  
BIOINSPIRIERTE TECHNOLOGIEN



**FIT**  
**FREIBURGER ZENTRUM FÜR INTERAKTIVE WERKSTOFFE**  
**UND BIOINSPIRIERTE TECHNOLOGIEN**

Stefan-Meier-Straße 21

D-79104 Freiburg

T: (+49) 761 203 67879

F: (+49) 761 203 4709

E: [mail@fit.uni-freiburg.de](mailto:mail@fit.uni-freiburg.de)

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

Sekretariat: Antonia Duma

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Rolf Mülhaupt

Kommissarische Verwaltungsleiterin: Dr. Stefanie Meisen

Wissenschaftliche Koordination: Dr. Olga Speck

Titelbild: FIT-Gebäude © S. Meisen

ISBN: 978-3-946018-00-1



# Inhaltsverzeichnis

FIT .....	2
Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien .....	2
Das Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien .....	6
Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies .....	7
Das FIT-Gebäude .....	9
The FIT Building.....	10
Zukunftsfelder am FIT .....	11
Struktur.....	11
Forschungsfelder.....	11
Technologieplattformen .....	11
Future Fields at FIT.....	12
Research Areas.....	12
Technology Platforms.....	12
Leitung / Management .....	12
Direktorium / Directorate .....	12
Mitglieder / Members.....	13
Wissenschaftlicher Beirat / Scientific Board .....	13
Internes Beratungsgremium / Integrative Board .....	14
Finanzen / 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 .....	17
Inspiriert durch Pflanzen und Tiere: Aktiv bewegte, stabförmige Strukturen mit adaptiver Steifigkeit und gelenkfreier, stufenloser Beweglichkeit .....	19
Inspired by plants and animals: actively actuated rod-shaped structures exhibiting adaptive stiffness and joint-free continuous kinematics .....	21
Kinematik planarer, gekrümmter und gewellter Pflanzenstrukturen als Ideengeber für bewegliche Strukturen in der Architektur .....	23
Kinematics of planar, curved and corrugated plant surfaces as concept generators for deployable systems in architecture .....	26

Verzweigungen und Achsen von ausgewählten Pflanzenarten als Ideengeber für hoch belastbare Verbindungen in verzweigten Baustrukturen .....	28
Branchings and axes in selected plant species as concept generators for high load-bearing joints of branched building structures .....	30
Kontinuierliche Gebäudehüllenextrusion auf der Basis der Schneckenschalenbildung.....	31
Continuous fused deposition modelling of architectural envelopes based on the cell formation of molluscs .....	33
Projekte.....	35
SFB-TRR 141 .....	35
Biologisches Design und integrative Strukturen – Analyse, Simulation und Übertragung in die Architektur.....	35
Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture .....	39
IRTG.....	41
Internationales Graduiertenkolleg (IRTG) "Weiche Materie: Von molekularen Kräften zu neuen Materialien“ .....	41
International Research Training Group (IRTG) “Soft Matter Science: Concepts for the Design of Functional Materials” .....	44
FIT-Kolloquium 2014.....	46
Publikationen / Publications.....	47
Präsentationen / Presentations .....	48
Impressum .....	50

## DAS FREIBURGER ZENTRUM FÜR INTERAKTIVE WERKSTOFFE UND BIOINSPIRIERTE TECHNOLOGIEN

Die bioinspirierte Materialforschung am FIT eröffnet völlig neue Dimensionen für intelligente Materialien (smart materials) und Systeme, die interaktiv sind und sich an Veränderungen ihrer Umwelt anpassen können. Diese Materialien und Systeme werden zukünftig den Menschen im täglichen Leben begleiten und zur Verbesserung seiner Lebensqualität, Sicherheit und Gesundheit beitragen. Dabei stehen die Schonung von Ressourcen und die effiziente Nutzung von Energien für uns im Vordergrund.

Das Freiburger Zentrum für interaktive Werkstoffe und bioinspirierte Technologien (FIT) ist eine zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Das Zentrum dient fakultätsübergreifend und interdisziplinär der Grundlagenforschung. Zentrales Ziel ist die Erforschung von interaktiven Funktionsmaterialien und intelligenten Systemen, die sich am Vorbild der Natur orientieren. Das FIT soll eine fach- und fakultätsübergreifende Brücke zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften bauen. Bei der Akquirierung der Mitglieder wird auf die Förderung der Interdisziplinarität innerhalb der Grundlagenforschung geachtet, damit dies seine Entsprechung findet.

Dabei wird die Konzeptentwicklung im Bereich der Charakterisierung sowie Modellierung und Simulation interaktiver Materialien eine zentrale Rolle spielen.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Weiterentwicklung von Prozessen innerhalb der Fertigungstechnologie für bioinspirierte, biofunktionale und biobasierte Materialien. Grundlagenforschung in den Bereichen der Prozessabläufe bei der Herstellung, der Analytik und der Synthese maßgeschneiderter Materialien sind notwendig, um ausreichende Kenntnisse zu gewinnen. Diese Kenntnisse werden dazu eingesetzt, entsprechende Materialien dann in Systemen zu integrieren. Bioinspirierte, energieautarke (Mikro-)Systeme werden genauso wie integrierte Systemmaterialien für die Energietechnik und interaktive Materialien und intelligente Oberflächen für adaptive polymere Werkstoffe Ziel unserer Arbeit sein.

Um die Forschung auf diesem Gebiet betreiben zu können, ist es notwendig, Unterstützung durch entsprechende Kompetenzen und Infrastruktur zu erhalten. Deshalb werden drei Technologieplattformen aufgebaut: 1. Speziallabor für Mikroskopie und Tomographie, verbunden mit dem Aufbau eines Kompetenznetzes 3D-Visualisierung, 2. Fertigungstechniklabore für bioinspirierte Materialien mit Schwerpunkten auf Folien-Druck-Technologien und 3. Konzeptentwicklung, Modellierung und Simulation interaktiver Materialien.

Gleichzeitig muss sich das FIT in der Forschungslandschaft der Universität etablieren. Die Kooperation mit den beteiligten Fakultäten erzeugt dabei Transparenz und Akzeptanz für das Zentrum. Unter der strengen Auflage des Gemeinnützigkeitsrechts, müssen Projekte und Kooperationen angestoßen werden, die die Grundlage für die Funktionalität des FIT bilden. Wissenschaftliches Mitglied des Zentrums können Professor/inn/en oder Nachwuchsgruppenlei-



ter/innen werden, die Projekt- oder Arbeitsbereiche gemäß des Leitbildes aufweisen können, an der Universität tätig sind und bereit und in der Lage sind, die zu ihrer Verfügung stehende personelle und apparative Ressourcen für das Zentrum einzusetzen und Drittmittel für das Zentrum einzuwerben. Es soll eine ausgewogenes Verhältnis zwischen den beteiligten Fachdisziplinen gewahrt werden. Andere Mitglieder der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg können als Assoziiertes Mitglied aufgenommen werden, wenn sie Forschungsvorhaben im Sinne des FIT durchführen. Eine assoziierte Mitgliedschaft ist auch für außenstehende Wissenschaftler/innen möglich, vorrangig aus dem Bereich der Regio, die zielgerichtete Forschung auf diesem Sektor betreiben.

## FREIBURG CENTRE FOR INTERACTIVE MATERIALS AND BIOINSPIRED TECHNOLOGIES

Bioinspired materials research at the FIT opens up entirely new dimensions for smart materials and systems which are interactive and able to respond to changes in their environment. In the future, these materials and systems will be part of our daily life and help us to improve our quality of life, safety and health. In this context, the conservation of resources and the efficient use of energy are considered of crucial importance by us.

The Freiburg Center of Interactive Materials and Bio-Inspired Technologies (FIT) is a central scientific facility of the Albert-Ludwig University Freiburg. The Center is an interdepartmental and interdisciplinary institution engaged in basic research. Its primary objective is to investigate interactive functional materials and smart systems adapted from designs found in nature. The purpose of the FIT is to create a bridge across subjects and departments between natural sciences and engineering. In the recruitment of members, attention will be paid to promote interdisciplinarity in the basic research activities in order to implement this vision.

Developing concepts in the field of characterizing, modeling and simulating interactive materials will be of key importance. Another focus will be the further development of processes within the production technology for bio-inspired, bio-functional and bio-based materials. Basic research on the processes for manufacturing, analyzing and synthesizing customized materials is necessary to create a sufficient knowledge base. This knowledge will then be used to integrate relevant materials into systems. Our work will be aimed at developing bio-inspired, self-powered (micro-) systems, integrated material systems for energy technology and interactive materials as well as smart surfaces for adaptive polymer materials.

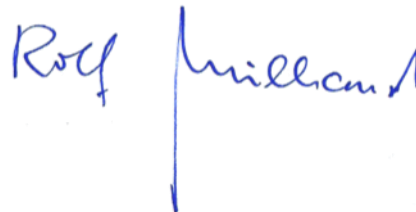
For successful research in this field support by relevant competencies and infrastructure is indispensable. Therefore three technology platforms will be established: 1. Special laboratory for microscopy and tomography associated with the development of a competence network for 3D visualization, 2. industrial

engineering laboratories for bio-inspired materials concentrating on film-printing technologies and 3. development of concepts, modeling and simulation of interactive materials.

At the same time, the FIT has to establish itself within the research landscape of the University. Transparency and acceptance of the Center will be ensured by collaboration with the departments involved. Under the rigid conditions of non-profit legislation, projects and collaborations must be initiated which will be the basis for the functionality of the FIT. Scientific members of the Center can be professors or junior group leaders whose projects or fields of activity correspond to our guiding principle, who work at the University and who are prepared and able to use the human and technical resources available to them for the Center and to raise external and third-party funds.

It is intended to maintain a balanced relation between the various disciplines involved. Other members of the Albert-Ludwig University Freiburg can be accepted as Associate Members if they do research work as defined by the FIT. Associate membership is also possible for external scientists, preferably from the Upper Rhine Region, who conduct targeted research in this sector.

This report wants to give you an idea of our first projects and the success already achieved.

A handwritten signature in blue ink that reads "Rolf Mülhaupt". The signature is written in a cursive style with a vertical line extending downwards from the end of the name.

Prof. Dr. Rolf Mülhaupt

## DAS FIT-GEBÄUDE

### Was bietet der neue FIT-Forschungsbau?

Die Mitglieder des FIT finden in dem neuen Forschungsgebäude sehr gute Rahmenbedingungen für die Bearbeitung ihrer Forschungsprojekte vor. Die Fotos zeigen den Stand der Baumaßnahmen Anfang Februar 2015.

- 18 klimatisierte Labore für chemische, biologische und messtechnische Arbeiten. Die Labore bestehen in der Regel aus Hauptlaborzone (40 m<sup>2</sup>), 2 Vorbereitungszonen mit Geräteaufstellplätzen (20 m<sup>2</sup>), Auswerteplatzzone (14 m<sup>2</sup>). Grundmedien: Digestorien, Strom (230V, 400V, USV), EDV, Reinstwasser, Kühlwasser, Vakuum, Druckluft, Hausstickstoff, Chemikalienschränke, Gasflaschenschränke;
- 3 Technologieplattformen: 1. 3D-Visualisierung mit Speziallabor für Mikroskopie und Tomographie, 2. Fertigungstechnik für bioinspirierte Materialien mit Schwerpunkten auf Nanolithographie-, Folien- und 3D-Druck-Technologien, 3. Konzeptentwicklung, Modellierung und Simulation interaktiver Materialien;
- 139 Büroarbeitsplätze in Räumen verschiedener Größe mit Standardmöblierung und edv-technischer Infrastruktur. Innovative sommerliche Temperaturregelung durch Nutzung von Brunnenkühlwasser zur Betonkernaktivierung;
- 3 Besprechungsräume für 8-12 Personen mit angeschlossenen Teeküchen;
- 1 Seminarraum für 70 Personen;

- Ausstellungsfläche für wissenschaftliche Veranstaltungen;
- Kommunikationsflächen, die den Mitgliedern der verschiedenen Arbeitsgruppen im Gebäude die Möglichkeit des Austauschs bieten.



Abb. 1: Labor. © R. Giersiepen



Abb. 2: Büroraum. © R. Giersiepen



Abb. 3: Seminarraum. © R. Giersiepen

## THE FIT BUILDING

### What to expect from the new FIT building?

The members of FIT may look forward to very suitable conditions in the new FIT building for their research projects. The photographs show the construction site early February 2015.

- 18 air-conditioned labs for chemical, biological and measurement technology tasks. The labs consist of a main lab zone (40 m<sup>2</sup>), 2 preparatory zones with machinery area (20 m<sup>2</sup>), a desk zone (14 m<sup>2</sup>). Media available: fume hood, electricity (230V, 400V, UPS), IT infrastructure, ultrapure water, cooling water, vacuum, compressed air, nitrogen, safety cabinet for chemicals, safety cabinet for gases;
- 3 technology platforms: 1: 3D-visualisation with special labs for microscopy and tomography, 2: manufacturing technology for bioinspired materials focussing on nanolithography-, film- und 3D-print technologies, 3: development of concepts, modelling and simulation of interactive materials;
- 139 desk space in offices of various sizes with standard equipment and IT-Infrastructure. Innovative temperature control by using cooling water from natural wells for concrete ceiling activation;
- 3 meeting rooms for 8-12 participants equipped with kitchenette;
- 1 lecture hall for 70 people;
- Exhibition area for scientific events;
- Communication zones stimulating interaction of members of different groups.



Abb. 4: Ausstellungsfläche. © R. Giersiepen



Abb. 5: Kommunikationsfläche. © R. Giersiepen



Abb. 6: Besprechungsraum. © R. Giersiepen

Fig 1: Lab. © R. Giersiepen

Fig. 2: Office. © R. Giersiepen

Fig. 3: Lecture hall. © R. Giersiepen

Fig. 4: Exhibition area. © R. Giersiepen

Fig. 5: Communication zone. © R. Giersiepen

Fig. 6: Meeting room. © R. Giersiepen

# ZUKUNFTSFELDER AM 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

### TECHNOLOGIEPLATTFORMEN

- Technologieplattform 1: 3D-Visualisierung mit Speziallabor für Mikroskopie und Tomografie, Aufbau eines Kompetenznetzwerkes
- Technologieplattform 2: Fertigungstechnik für bioinspirierte Materialien mit Schwerpunkten auf Nanolithografie-, Folien- und 3D-Druck-Technologien
- Technologieplattform 3: Konzeptentwicklung, Modellierung und Simulation interaktiver Materialien

## FUTURE FIELDS AT FIT

### 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

### TECHNOLOGY PLATFORMS

- Technology Platform 1: Network of competence 3D visualisation with specialised laboratory for microscopy and tomography
- Technology Platform 2: Manufacturing technique for bioinspired materials with focus on nanolithography, film technology, and generative processes
- Technology Platform 3: Concept development, modelling and simulation of interactive materials

## 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  
(Kommissarische Verwaltungsleitung)  
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 Res-  
ourcen

Prof. Dr. Peter Woias  
Technische Fakultät

## MITGLIEDER / MEMBERS

Für die Mitglieder werden zeitlich befris-  
tet Projektlabore mit der entsprechenden  
Infrastruktur zur Verfügung gestellt.  
Gleichzeitig werden die drei Technolo-  
gieplattformen 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. Rainer Giersiepen (Technische Fa-  
kultät)

Prof. Marie-Pierre Laborie, Ph.D. (Fakul-  
tät für Umwelt und Natürliche Ressour-  
cen)

Dr. Karen Lienkamp (Technische Fakul-  
tät)

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

Prof. Dr. Günter Reiter (Fakultät für Ma-  
thematik und Physik)

Prof. Dr. Thomas Speck (Fakultät für  
Biologie)

Dr. Simon Thiele (Technische Fakultät)

Dr. Ralf Thomann (FMF)

Dr. Yi Thomann (FMF)

Dr. Michael Walter (FMF)

Prof. Dr. Peter Woias (Technische Fa-  
kultät)

## WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT / SCIENTIFIC BOARD

Der Beirat begleitet die wissenschaftli-  
chen Arbeiten des Zentrums. Er soll  
dem Direktorium Anregungen für die  
weitere Entwicklung des Zentrums ge-  
ben. Mitglieder können externe Hoch-  
schullehrer/innen werden, deren For-  
schungsschwerpunkte im Tätigkeitsge-  
biet 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 Dres-  
den)

Prof. Dr. Oskar Paris (Montanuniversität  
Leoben, Österreich)

Prof. Dr. Thomas Scheibel (Universität  
Bayreuth)

## INTERNES BERATUNGSGREMIUM / INTEGRATIVE BOARD

Das Integrative Board wird als universitätsinternes Beratungsgremium eingerichtet und begleitet die Entwicklung des FIT. Es wirkt auf den Interessenausgleich der am FIT inhaltlich beteiligten Fakultäten und Einrichtungen hin.

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

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

Prof. Dr. Wolfgang Driever (Dekan der Fakultät für Biologie)

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

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

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

Prof. Dr. Bernhard Breit (Dekan der Fakultät für Chemie und Pharmazie)

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

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

N.N. (Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats)

Dr. Bruno Ehmman (Leiter Freiburger Research Services)

Dr. Stefanie Meisen (Kommissarische Verwaltungsleiterin des FIT)

## FINANZEN / FINANCES

2014 wurden am FIT drei Projekte gestartet. Damit hatten wir in diesem Jahr ein Ausgabevolumen von 106.417 €.

Das FIT verfügt bisher nur über eine etatisierte 50 % Stelle, die für die wissenschaftliche Koordinatorin eingesetzt wird. Diese Stelle wird von der Fakultät für Biologie gestellt. Alle weiteren personell notwendigen Stellen für die Verwaltung sind nicht etatisiert und wurden vom FMF gestellt. Die notwendige technische Unterstützung hat bisher die Technische Fakultät übernommen.

Für die Forschung lag der Anteil der Personalausgaben am Gesamthaushalt bei 89 %. Das FIT betreute im Berichtsjahr sechs Principal Investigator (PI), fünf Doktoranden/innen, zwei Postdocs, eine technische Assistentin und einen Hilfwissenschaftler (Bachelor).



## HIGHLIGHTS

Seit 01.10.2014 werden im Rahmen des SFB - TRR 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ (Standortsprecher Freiburg: Prof. Dr. Thomas Speck) sechs Projekte am FIT durchgeführt.

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

G. Bauer<sup>1</sup>, L. Hesse<sup>1</sup> & T. Speck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Plant 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“  
– Projekte A02 und B01

Die Studie ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt basierend auf der Kooperation von Biologen der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg mit Architekten und Ingenieuren des Instituts für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart (Direktor: Prof. Werner Sobek) und Materialforschern und Mathematikern des Instituts für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre der Universität Stuttgart (stellv. Direktor Prof. Siegfried Schmauder) sowie Materialforschern und Geologen der Angewandten

Mineralogie aus dem FB Geowissenschaften der Universität Tübingen (Leiter: Prof. Klaus Nickel).

In vielen Anwendungsbereichen des Bauwesens ist eine Kombination aus Leichtbaukonstruktion, hoher Energiedissipationsfähigkeit und lokal angepasster Durchstoßfestigkeit von großem Interesse. In der Biologie findet man eine Vielzahl von potentiellen Vorbildern vor, die eine oder mehrere dieser Eigenschaften aufweisen. Als Inspirationsquelle für eine Übertragung dieser Eigenschaften in technische Produkte sollen v.a. Seeigelstachel und -skelette (bearbeitet durch unsere Projektpartner der Angewandten Mineralogie der Universität Tübingen) sowie stark energiedissipierende und durchstoßfeste Schalen von Früchten und Samen, und aufpralldämpfende Rinden (bearbeitet durch die Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg) dienen (u.a. [1-7]).

Zentrale Forschungsschwerpunkte der Projekte A02 und B01 sind:

- Übertragung von strukturellen und funktionellen Eigenschaften von aufprallgeschützten, energiedissipierenden und durchstoßfesten biologischen Vorbildern auf lasttragende technische Materialien für Anwendungen im Bauwesen
- Untersuchen der Größe-Volumen-Eigenschafts-Beziehungen dieser biologischer Vorbilder sowie biomimetischer poröser Strukturen (Weibull-Statistik)

Nach quantitativen Analysen, die ein tieferes Verständnis und die Abstraktion der biomechanischen, morphologischen und anatomischen Eigenschaften der biologischen Vorbilder erlauben, sollen diese mittels Computersimulation zu-

sammen mit unseren Projektpartnern des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart modelliert und evaluiert werden. Diese Simulationen legen die Basis für ein besseres Verständnis der biologischen Vorbildstrukturen im Zuge der Reversen Bionik. Ausgehend von diesen Ergebnissen werden bioinspirierte strukturierte poröse und/oder faserverstärkte Beton- und Keramikmaterialien entwickelt und gebaut.



Abb. 1: Steinkern der Seychellenpalme (*Lodoicea maldivica*). Die einzelnen einen Samen enthaltenden Steinkerne können über 40 cm lang und bis zu 25 kg schwer werden [8]. © Plant Biomechanics Group Freiburg, Bild aufgenommen im Naturhistorischen Museum Mainz

Des Weiteren werden anhand einiger dieser aufprallgeschützten Fruchtwände, Samenschalen und Rinden sowie noch zu entwickelnder biomimetischer poröser Strukturen – in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der Angewandten Mineralogie der Universität Tübingen sowie des Instituts für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre der Universität Stuttgart – Größe-Volumen-Eigenschafts-Beziehungen untersucht

und diese mit bestehenden Modellen aus den Materialwissenschaften (z.B. [8,9]) verglichen. Dabei soll untersucht werden, ob diese – für spröde Materialien aufgestellten – Modelle auch für nicht-spröde biologische Materialien und Strukturen gelten. Die dazu ausgewählten biologischen Vorbilder decken einen möglichst großen Bereich der Längenskala ab. So sollen z. B. nicht nur kleine Samen und Früchte mit Durchmessern von einigen Millimetern oder wenigen Zentimetern, sondern auch größere und schwere Früchte und Samen wie z. B. die Seychellennuss *Lodoicea maldivica* (siehe Abb. 1), untersucht werden. Ein einzelner Steinkern der Seychellenpalme, der einen Samen enthält, kann eine Länge von über 40 cm erreichen und bis zu 25 kg wiegen [10]. Die Früchte, die bis zu drei Steinkerne mit jeweils einem Samen enthalten, müssen somit bei einer Pflanzenhöhe von bis zu 30 m [11] beträchtliche Kräfte beim Aufprall auf den Untergrund überstehen. Entsprechend der bestehenden Modelle aus den Materialwissenschaften soll die Skalierbarkeit der mechanischen Eigenschaften entlang dieses gesamten abgedeckten Größenbereichs der biologischen Vorbilder in mathematischer Form analysiert werden.

### Literatur

- [1] P. Schüler, T. Speck, A. Bührig-Polaczek & C. Fleck, PLoS ONE 9(8), e102913. DOI:10.1371/journal.pone.0102913, (2014)
- [2] C. Fleck, P. Schüler, D. Meinel, P. Zaslansky & J.D. Currey, Bioinsp. Biomim. Nanobiomater. 1, 67-75, (2012)
- [3] R. Seidel, M. Thielen, C. Schmitt, A. Bührig-Polaczek, C. Fleck & T. Speck, in: C.A. Brebbia & A. Carpi (eds.), Design and Nature V, WIT Press, Southampton, Boston, 421-430, (2010)
- [4] S.F. Fischer, M. Thielen, P. Weiß, R. Seidel, T. Speck, A. Bührig-Polaczek & M. Bünck, J. Mater. Sci. 49, 43-51, (2014)

- [5] S.F. Fischer, M. Thielen, R.R. Loprang, R. Seidel, C. Fleck, T. Speck & A. Bührig-Polaczek, *Adv. Eng. Mater.* 12, B658-B663, (2010)
- [6] M. Thielen, T. Speck, T. & R. Seidel, *J. Mater. Sci.* 48, 3469-3478, (2013)
- [7] M. Thielen, C.N.Z. Schmitt, S. Eckert, T. Speck & R. Seidel, *Bioinspir. Biomim.* 8, DOI:10.1088/1748-3182/8/2/025001, (2013)
- [8] W. Weibull, *J. Appl. Mech.* 9, 293-297, (1951)
- [9] R. Danzer, P. Supancica, J. Pascuala & T. Lubea, *Eng. Fract. Mech.* 74, 2919-2932, (2007)
- [10] P.B. Tomlinson, *Bot. J. Linn. Soc.* 151, 5–14, (2006)
- [11] P.J. Edwards, J. Kollmann & K. Fleischmann, *Nord. J. Bot.* 22 (2), 227-237, (2002)

**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**

G. Bauer<sup>1</sup>, L. Hesse<sup>1</sup> & T. Speck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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“ – Projects A02 and B01

The study represents an interdisciplinary research project based on the collaboration of biologists of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg with architects and engineers of the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design of the University

of Stuttgart (Head: Prof. Werner Sobek) and material scientists and mathematicians from the Institute for Materials Testing, Materials Science and Strength of Materials of the University of Stuttgart (Representative Head: Prof. Siegfried Schmauder), and also material scientists and geologists from Applied Mineralogy, Department of Geosciences of the University of Tübingen (Head: Prof. Klaus Nickel).

In many areas in the building industry a combination of light-weight construction, high energy dissipation and locally adapted puncture resistance is of increasing interest. In biology, a multitude of potential concept generators can be found, which display one or more of these properties. A source of inspiration for a transfer of these properties in technical products include sea urchin spines and skeletons (studied by our project partners from the ‘Applied Mineralogy’ of the University of Tübingen) as well as highly damping and puncture resistant peels and coats of fruits and seeds, and impact resistant barks (examined by the Plant Biomechanics Group, University of Freiburg) (e.g. [1-7]).

Central aims of the research projects A02 and B01 include:

- Transfer of structural and functional properties of impact protected highly damping and puncture resistant biological role models into load bearing technical materials for applications in the building industry
- Quantitative examination of the size-volume-property-relations of the studied biological role models as well as of biomimetic porous structures (Weibull-statistics)

## Highlights

After quantitative analyses allowing for a deeper understanding and abstraction of the biomechanical, morphological and anatomical features of the biological role models, these features are to be modelled and evaluated via computer simulations. The latter results are the basis for the technical transfer but also for a deeper understanding of the biological concept generators in the course of reverse biomimetics. Starting from these results bio-inspired structured porous and/or fiber-reinforced concrete and ceramic materials will be developed and built together with our project partners of the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design of the University of Stuttgart.

Furthermore, together with our project partners from Applied Mineralogy of the University of Tübingen and the Institute for Materials Testing, Materials Science and Strength of Materials of the University of Stuttgart, these impact protected fruit peels, seed coats and barks, as well as prospective biomimetic porous structures, will be examined with regards to their size-volume-property-relations and shall be compared to existing material science models [e.g. 8,9]. As the existing models were developed for brittle materials only, this project shall answer the question whether they also account for non-brittle biological materials and structures. The selected biological role models will cover a wide range of length scales. Thus, e.g. not only small seeds and fruits with a diameter of several millimeters up to a few centimeters, but also larger and heavier fruits and seeds, such as the sea coconut *Lodoicea maldivica* (see Fig. 1), will be examined. A single pyrene of the sea coconut (containing one seed) can reach a length of

more than 40 cm and weigh up to 25 kg [10].

Fruits (containing up to three pyrenes with seeds) are confronted with high impact forces when falling from the up to 30 m high trees [11]. According to the existing material science models, the scalability of the mechanical properties along the whole range of length scales of the biological models shall be analysed.

Fig. 1: Pyrene of the sea coconut (*Lodoicea maldivica*) containing one seed. A single pyrene can reach a length of more than 40 cm and weigh up to 25 kg [8]. © Plant Biomechanics Group Freiburg, photo taken in the Natural History Museum Mainz

**Inspiziert durch Pflanzen und Tiere: Aktiv bewegte, stabförmige Strukturen mit adaptiver Steifigkeit und gelenkfreier, stufenloser Beweglichkeit**

Marco Caliaro<sup>1</sup>, Thomas Speck<sup>1,2</sup> & Olga Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg,

<sup>2</sup>Freiburger Institut für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT)

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

Dieses interdisziplinäre Forschungsprojekt ist eine Kooperation von Botanikern der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg (PI: Dr. Olga Speck), Zoologen der Universität Tübingen (PI: Prof. Dr. Oliver Betz), sowie Ingenieuren (PI: Prof. Dr. Jan Knippers) und Mathematikern (PI: Prof. Dr. Oliver Röhrle) der Universität Stuttgart.

Im Laufe der Evolution entwickelten sich sowohl bei Pflanzen (untersucht in Freiburg) als auch bei Tieren (untersucht in Tübingen) eine Vielzahl unterschiedlicher stab- oder röhrenförmiger Strukturen, welche in der Lage sind ihre Steifigkeit und ihre Form zu verändern, ohne dass „klassische“ Gelenkungen vorhanden sind, wie sie typischerweise heute in den Ingenieurwissenschaften Verwendung finden. Derartige adaptive Systeme können auf architektonische Konzepte übertragen werden und die technische Basis für die Konstruktion von neuartigen, kontinuierlich auf Veränderungen der Umwelt reagierende Gebäudefassaden darstellen. Hierdurch kön-

nen deren Effizienz erhöht und der benötigte Aufwand für die Instandhaltung drastisch vermindert werden. Die Kenntnis der biologischen Prinzipien, welche die Grundlage für derartige adaptive und gelenkfreie Bewegungsmechanismen darstellt, bietet ein hohes Potential für die Entwicklung neuer bionischer Technologien mit integrierter, kontinuierlicher Beweglichkeit [1]. Aus diesem Grund zielt die Zusammenarbeit im Rahmen dieses interdisziplinären Forschungsprojekts darauf ab, pflanzliche und tierische Strukturen mit adaptiver Steifigkeit und gelenkfreien Verbindungen zu abstrahieren und zu kombinieren, um daraus neue bioinspirierte technische Aktuatoren für Gebäude(-hüllen) zu entwickeln.

Die Umsetzung wird im Rahmen eines festgelegten Prozesses stattfinden, ausgehend von einem Screening krautiger Pflanzen und Invertebraten mit dem Ziel geeignete Ideengeber zu identifizieren, gefolgt von der quantitativen Analyse der Funktionsmorphologie und Biomechanik der ausgewählten Vorbilder sowie deren Abstraktion mit Hilfe von Finite Elemente Modellen mit unterschiedlicher Detailgenauigkeit.

Die Struktur-Funktions-Zusammenhänge bei Pflanzen mit adaptiver Steifigkeit werden quantitativ anhand von anatomischen Analysen und biomechanischen Tests untersucht. Die entscheidenden geometrische Daten, wie die Verteilung von festigenden Elementen (Kollenchym- und Sklerenchymfasern, Leitbündel) sowie von parenchymatischen Geweben und Epidermis, werden anhand von detaillierten histologischen Untersuchungen mit Hilfe digitaler Bildauswertungsprogramme quantifiziert (Abb.1).

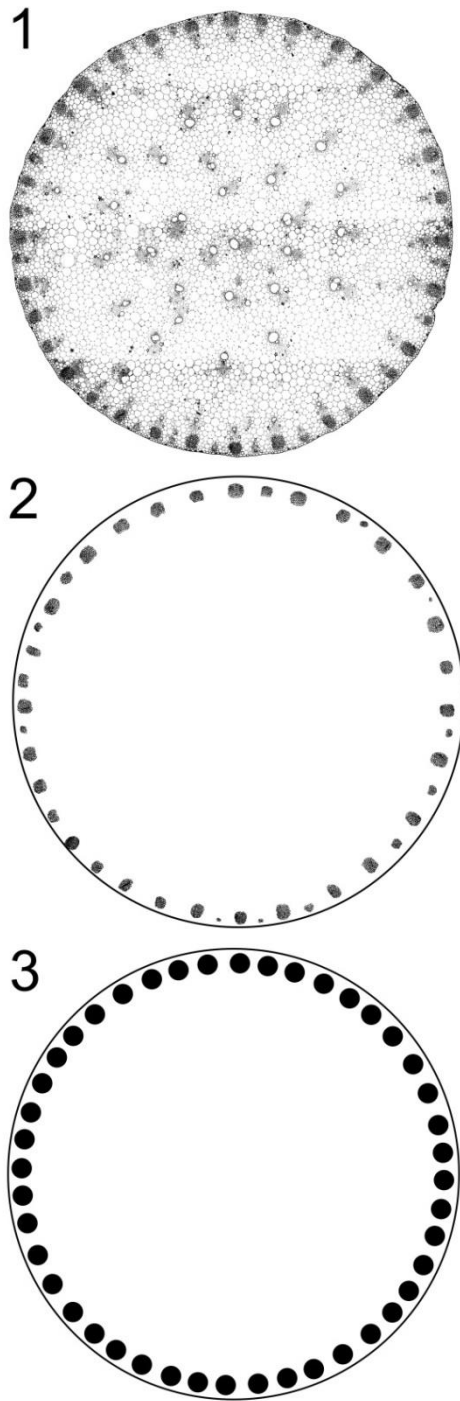


Abb. 1: Abstraktion der Gewebeverteilung bei der krautigen Pflanze *Caladium bicolor* 'Candyland'. Ausgehend von einer histologischen Dünnschnitt-Fotografie des Gesamtquerschnitts (1) wurden die adaptiven Fasern des Kollenchyms differenziert (2) und anschließend geometrisch abstrahiert (3). © Plant Biomechanics Group Freiburg

Die mechanischen Eigenschaften werden mittels Biege-, Zug-, Druck- und Torsionstests, analysiert. Da der Zell- und Gewebedruck des Parenchyms von entscheidender Bedeutung für die Bestimmung der tugorabhängiger adaptiver Steifigkeit ist, werden diese Werte parallel zu den mechanischen Tests mit Hilfe der Pressure Probe Methode und mittels eines Testaufbaus mit einer Glasfaseroptik (samba sensor<sup>®</sup>) bestimmt [2,3]. Es werden Testreihen mit den im Rahmen des screenings ausgewählten Pflanzenarten bei unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit durchgeführt, um die adaptiven Eigenschaften zu analysieren. Um die bei den verschiedenen Pflanzenarten zu Grunde liegenden Funktionsprinzipien für den späteren Abstraktionsprozess aufzuzeigen, werden diese Untersuchungen in gleicher Weise bei allen Testpflanzenarten durchgeführt.

Bei Tieren sind ähnliche Systeme verbreitet, wie z. B. hydrostatische zylindrische Strukturen. Bei diesen Systemen bestimmt die Ausrichtung der Fasern bei extern gelegenen Organen oder eine Körperwand die Form und schränkt die Formänderungen ein. In Verbindung mit dem in der Körperflüssigkeit herrschenden Druck wird durch diese faserverstärkten Strukturen, eine adaptive Anpassung der Steifigkeit des Körpers ermöglicht.

Des Weiteren besitzen einige Insekten Mechanismen mit denen sie nadelförmige kutikuläre und miteinander über ihre gesamte Länge verzahnte Strukturen ausfahren können, die sich hierbei gelenkfrei bewegen. In diesen Fällen ermöglicht der Verzahnungsmechanismus, in Verbindung mit den variablen Materialeigenschaften der Kutikula, eine adaptive Steifigkeitsveränderung des Gesamtsystems. Derartige Systeme finden

sich beispielsweise bei den stabförmigen Stech- und Saugwerkzeugen oder Eiablageorganen von Insekten [4].

Im Bereich der Bionik sind die Funktionsprinzipien sowie das technologische Potential derartiger stabförmiger Systeme mit adaptiver Steifigkeit wie sie bei Pflanzen und Tieren gefunden werden bisher weitgehend unerforscht. Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts sollen Kombinationen solcher Funktionsprinzipien mit Hilfe von Faserverbundmaterialien mit integrierten pneumatischen oder andersartigen Aktuatoren auf bioinspirierte Materialien und Strukturen für den Einsatz in Tragkonstruktionen im Bauwesen übertragen werden. Der technischen Umsetzung geht dabei eine Analyse der ausgewählten biologischen Vorbildstrukturen und der bionischen Demonstratoren mit Hilfe von FE-Modellen voraus, die für eine Optimierung der Demonstratoren im Rahmen iterativer Prozessabläufe verwendet werden. Die FE-Modelle sind nicht nur von grundlegender Bedeutung für eine erfolgreiche Umsetzung der Ideen aus der Biologie in bioinspirierte technische Lösungen, sondern werden im Zuge der reversen Bionik auch zu einem verbesserten Verständnis der biologischen Vorbildstrukturen beitragen.

#### Literatur

- [1] J. Knippers & T. Speck, *Bioinspir. Biomim.* 7, DOI:10.1088/1748-3182/7/1/015002, (2012)
- [2] M. Caliaro, F. Schmich, T. Speck & O. Speck, *Am. J. Bot.*, 100, 2141-2148, (2013)
- [3] M. Caliaro, F. Flues, T. Speck & O. Speck, *Int. J. Plant Sci.*, 174, 161-170, (2013)
- [4] P. Wenk, S. Lucic & O. Betz, *O., Zool. Morphology*, 129, 225-234, (2010)

## **Inspired by plants and animals: actively actuated rod-shaped structures exhibiting adaptive stiffness and joint-free continuous kinematics**

Marco Caliaro<sup>1</sup>, Thomas Speck<sup>1,2</sup> & Olga Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group (PBG) Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg, <sup>2</sup>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

The study represents an interdisciplinary research project based on the collaboration of 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), engineers (PI: Prof. Dr. Jan Knippers), and mathematicians (PI: Prof. Dr. Oliver Röhrle) of the University of Stuttgart.

During evolution plants (analysed in Freiburg) and animals (analysed in Tübingen) developed a great variety of different rod-like or tube-like structures, able to change their stiffness and shape without using “classical” joints as typically used in today’s engineering. Transferred into architecture such bioinspired adaptive systems can serve as a technological basis for the construction of a novel type of façade shading systems that can continuously react to changes in the environment and thus become more efficient and sustainable. The knowledge of the biological principles as basis of such adaptive and joint-free

## Highlights

mechanisms contains a great potential for the biomimetic development of new technologies with integrated continuous movement and a reduced need for maintenance. Therefore, this project aims to combine and abstract plant and animal structures with adaptive and joint-free motion processes to develop new biomimetic technical actuators for buildings [1].

The realisation will take place in a framework starting with a screening of herbaceous plants and invertebrates for finding suitable concept generators, followed by the quantitative analysis of the functional morphology and biomechanics of selected concept generators and their abstraction by using finite element models of variable level of detail.

The form-structure-function-relationships of plants with adaptive stiffness will be analysed quantitatively based on anatomical studies and biomechanical tests. The crucial geometric values like distribution of stiffening elements (collenchyma and sclerenchyma fibres, vascular bundles) and of parenchyma and epidermis are analysed using detailed histological studies and digital image evaluation programs (Fig. 1). The mechanical properties are studied with bending, tension, compression, and torsion tests. As cell and tissue pressure are crucial factors influencing turgor-dependent adaptive stiffness they will be studied parallel to the mechanical tests by using pressure probe and a novel tissue pressure testing device (samba sensor<sup>®</sup>) [2,3]. Test series with plants at different levels of water availability will be conducted to reveal the different adaptive properties. These studies will be conducted comparatively to illustrate the underlying functional principles in various plant species.

In animals similar systems as e.g. tube-like hydrostatic structures are common. In these systems shape and shape change are constricted by the course of the fibres of an external organ or body wall which in addition together with internal fluid pressure allows for adaptive stiffness.

Furthermore, some insects have extendable needle-like cuticular structures consisting of interlocked parts. This structure gives them the ability for hingelessly movements and – in combination with the variable mechanical properties of the cuticle – allows for adaptively changing the stiffness of the overall system. Such systems can be found in rod-shaped piercing or sucking mouthparts or ovipositors in insects and will be analysed from zoologists in Tübingen [4].

In biomimetics the functional principles as well as the technological potential of such cylindrical rod-shaped structures with adaptive stiffness as found in plants and animals are widely unexplored. In this interdisciplinary research project combinations of the functional principles found in biological concept generators will be transferred into fibre composite materials with integrated pneumatic actuators or other types of actuators for the application in building construction. The technical implementation will be preceded and optimized in iterative process loops by the application of finite element models of the biological concept generators and of the biomimetic demonstrator materials and structures. In additions to being crucial for a successful transfer into bioinspired solutions the finite elements models will also help for an improved understanding of the biological role models using the process of reverse biomimetics.



Fig. 1: Exemplary abstraction of the tissue distribution of *Caladium bicolor* 'Candyland'; Based on histological images of the cross-section (1) the adaptive collenchyma fibres were differentiated (2) and subsequently abstracted geometrically (3). © Plant Biomechanics Group Freiburg

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

M. Thielen<sup>1,2</sup> & T. Speck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg,

<sup>2</sup>Freiburger Institut für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT)

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

Die Studie ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt basierend auf der Kooperation zwischen Biologen der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg und Ingenieuren der Universität Stuttgart vom Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (Direktor: Prof. Jan Knippers), dem Institut für Baustatik und Baudynamik (Direktor: Prof. Manfred Bischoff) und dem Institut für Textiltechnik, Faserbasierte Werkstoffe und Textilmaschinenbau (Direktor: Prof. Götz Gresser).

Der dringende Bedarf an energieeffizienter und nachhaltiger Architektur führt zu einer gesteigerten Nachfrage an adaptiven Gebäudehüllen, welche in der Lage

sind sich an wechselnde externe Umweltbedingungen und interne Komfortbedürfnisse anzupassen. Solche Systeme werden bis dato entwickelt und gestaltet, indem steife Bauteile oder flexible Textilien entlang geradliniger Translations- oder Rotationsachsen angebracht werden und unter Nutzung stark belasteter Gelenke oder Lager bewegt werden. Im Bauwesen sind solche Konzepte jedoch verschiedenen Limitierungen unterworfen [1]:

Großflächige adaptive, planare oder gekrümmte Strukturen, wie sie z.B. bei mobilen Dachkonstruktionen zu Einsatz kommen, sind individuelle Konstruktionen, welche an spezifische Bedingungen angepasst sind und ohne teure Prototypen und Testläufe auskommen müssen. Das Gebäude als solches ist der Prototyp, der beim ersten Versuch funktionieren muss.

Aufgrund des steigenden Interesses der Architektur an ausgefallenen Geometrien, kommt der Adaptabilität, die eine große Bandbreite an räumlichen Konfigurationen erlaubt, eine wachsende Bedeutung zu. Dies stellt insbesondere eine Herausforderung für die Entwicklung mittelgroßer Bauteile, wie z.B. Lüftungsklappen oder Jalousien, dar. Die Anpassung an unregelmäßige Geometrien kann heutzutage oft nur durch eine höhere mechanische Komplexität realisiert werden, wodurch solche Strukturen oft teuer, fehleranfällig und wartungsintensiv sind.

Für kinematische Elemente im Bauwesen sind die Kriterien „Robustheit“ und „Adaptabilität“ oft von vorrangiger Bedeutung, wohingegen andere Aspekte wie z.B. „Genauigkeit“ oder „Geschwindigkeit“ zweitrangig sind. Diese Kriterien werden von einer Vielzahl flächiger, sich

bewegender pflanzlicher Strukturen, wie z.B. von Blütenblättern oder Laubblättern, erfüllt. Diese robusten Bewegungsprinzipien, welche essentiell für grundlegende biologische Funktionen sind, basieren auf lokal adaptierten Steifigkeiten und dem Vermeiden von lokalen Dehnungsspitzen [1].

Ein zentraler Punkt ist hierbei eine detaillierte Betrachtung der Bewegungsabläufe und der Aktuationsmechanismen, sowie von deren Zusammenspiel mit den strukturellen Eigenschaften. Pflanzenbewegungen können hydraulisch aktiv, durch Turgoränderungen, aktuiert sein, wodurch es zu reversiblen (nastischen) oder zu irreversiblen (tropistischen) Wachstumsbewegungen kommt. Hydraulisch passiv können Bewegungen durch hygroskopisches Schwellen oder Schrumpfen von Zellen oder Geweben, sowie durch Kohäsionskräfte aktuiert sein. Andere Aktuationsmechanismen beruhen auf dem Freisetzen von, in vorgespannten Strukturen gespeicherter, elastischer Energie oder werden durch äußere mechanische Kräfte ausgelöst. Letzteres ist beispielsweise bei der Sitzstange der Paradiesvogelblume (*Strelitzia reginae*) der Fall. Diese besteht aus zwei verwachsenen Blütenblättern, welche die Fruchtknoten und Staubbeutel der Blüte bedecken. Sobald ein Vogel auf der Sitzstange landet, biegt diese sich nach unten, wodurch sich die Lamina nach außen biegt. Durch biomechanische Versuche konnte gezeigt werden, dass diese Bewegung mehr als 3000 mal wiederholt werden kann, ohne dass es dabei zu Ermüdungserscheinungen der Struktur oder des Materials kommt [2]. Dieser Mechanismus wurde bereits in einen 2000 x 250 mm großen, aus Glasfaser verstärkten Polymeren (GFK) bestehenden,

Demonstrator übertragen. Durch lokale Anpassungen der Faserorientierung wurde diese Struktur weiter optimiert, unter dem Warenzeichen Flectofin® registriert und im Jahre 2011 patentiert [3,4].

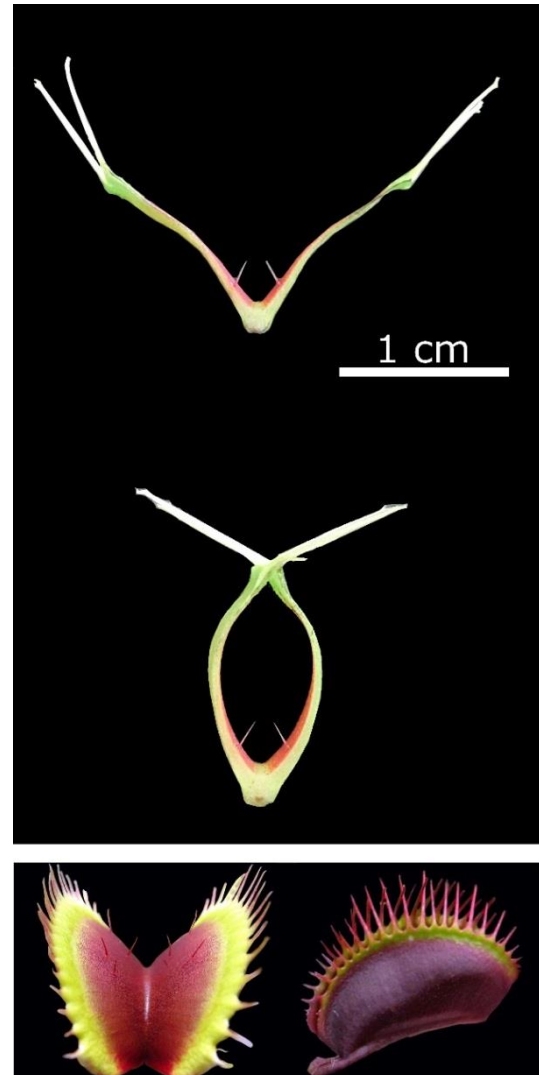


Abb. 1: Schnappfalle der Venusfliegenfalle in geöffnetem und geschlossenem Zustand; Aufsicht und Querschnitt durch ein Fangblatt. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Andere bekannte Beispiele von Bewegungen gekrümmter, zweidimensionaler Pflanzenstrukturen sind die Schnappfallen der engverwandten Venusfliegenfalle

(*Dionea muscipula*) und des Wasserrads (*Aldrovanda vesiculosa*). Das Schließen der Schnappfallenblätter der Venusfliegenfalle erfolgt durch schlagartige Konfigurationsänderung der beiden Blatthälften von einer konkaven in eine konvexe Form [5,6] (Abb. 1). Die konkave Form der Blatthälften des Wasserrads hingegen verändert sich während dem Zugschnappen nicht. Die Bewegung dieser Falle beruht auf kinematischer Verstärkung durch das Biegen der Mittelrippe [6,7,8]. Weitere Beispiele von Pflanzenbewegungen, deren Kinematik bereits teilweise analysiert wurde, sind die Blüten der Lilie (*Lilium* 'Casa-Blanca') [9] und von *Ipomoea alba* [10], sowie die Bewegungen der Fallentüren verschiedener Arten des Wasserschlauchs (*Utricularia* spp.) [11].

Ziel dieses Projekts ist es die, den Bewegungen planarer pflanzlicher Strukturen zugrunde liegenden, mechanischen Prinzipien im Detail zu beschreiben. Hierzu werden sowohl biomechanische Aspekte quantitativ analysiert als auch die Bewegungen und Aktuationsmechanismen durch kinetische FE-Modelle simuliert. Die zu untersuchenden biologischen Ideengeber werden so gewählt, dass die gesamte Bandbreite an Verformungsmustern und Aktuationsmechanismen (extern oder autonom) abgedeckt ist. Durch Variation der geometrischen und mechanischen Parameter in FE-Modellen sollen einerseits die Form-Struktur-Funktions-Zusammenhänge und deren Evolution besser verstanden werden (Reverse Bionik), andererseits soll, parallel dazu, untersucht werden ob und wie diese Mechanismen abstrahiert, hochskaliert und in kinetische, für die Architektur nutzbare, Strukturen übersetzt und integriert werden können. Die geplante technische Umsetzung basiert

auf faserverstärkten Polymeren, deren Steifigkeit durch Variation der Faserverläufe angepasst werden kann [1,4].

#### Literatur

- [1] T. Speck, J. Knippers & O. Speck, Archit. Design, Special Issue 'Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational', (2015) [in print]
- [2] S. Poppinga, T. Masselter, J. Lienhard, S. Schleicher, J. Knippers & T. Speck, in: C.A. Brebbia & A. Carpi (eds.), Design and Nature V, WIT Press, Southampton, Boston, 403-409, (2010)
- [3] J. Knippers, J. Lienhard, S. Schleicher, S. Poppinga, T. Masselter & T. Speck, European Patent Office.Filing: 10013852.8. (2011)
- [4] J. Lienhard, S. Schleicher, S. Poppinga, T. Masselter, M. Milwich, T. Speck & J. Knippers, Bioinspir. Biomim. 6, DOI:10.1088/1748-3182/6/4/045001, (2011)
- [5] Y. Forterre, Nature 433, 421-425, (2005)
- [6] S. Poppinga, T. Masselter & T. Speck, Bioessays 35, 649-657, (2013)
- [7] S. Poppinga & M. Joyeux, Phys. Rev. E 84, 041928, (2011)
- [8] S. Schleicher, J. Lienhard, S. Poppinga, T. Masselter, T. Speck & J. Knippers, in: D. Nethercot et al. (eds.), Proc. IABSE-IASS Symp. Taller Longer Lighter, London, UK, 9 pp. (2011)
- [9] S. Schleicher, J. Lienhard, S. Poppinga, T. Speck & J. Knippers, Computer-Aided Design 60, 105-117, (2014)
- [10] S. Schleicher, J. Lienhard, S. Poppinga, T. Speck & J. Knippers, in: C.A. Brebbia & A. Carpi (eds.), Design and Nature V, WIT Press, Southampton, Boston, 479-490, (2010)
- [11] O. Vincent, C. Weißkopf, S. Poppinga, T. Masselter, T. Speck, M. Joyeux, C. Quilliet & P. Marmottant, Proc. Roy. Soc. B 278, 2909-2914, (2011)

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

M. Thielen<sup>1,2</sup>, & T. Speck<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>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 A04

The study represents an interdisciplinary research project based on the collaboration between biologists of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg and engineers of the University of Stuttgart from the Institute of Building Structures and Structural Design (Head: Prof. Jan Knippers), the Institute for Structural Mechanics (Head: Prof. Manfred Bischoff) and the Institute for Textile Engineering, Fibre-based Materials and Textile Machine Construction (Head: Prof. Götz Gresser).

There exists an urgent demand for more energy-efficient and sustainable architecture which is leading to an increasing interest in adaptive building envelopes that can adjust to changing environmental conditions or internal comfort demands. In today's architecture, such systems are built by either rigid components or soft textiles which are joined along straight axes of translation and/or rotation by highly strained hinges or bearings. These concepts have limitations in building construction for several reasons [1]:

Typically, larger scale adaptive planar or curved structures, as for example retractable roofs, are unique constructions designed for specific functional requirements without extensive test runs. The building represents the prototype and has to function on the first attempt.

There exists an increasing interest of architecture in non-standard geometries and adaptability to a wide range of spatial configurations. Especially for medium-scale components such as louvers or blinds this is a specific challenge. Today typically additional mechanical complexity becomes necessary to allow the adaptation to irregular geometries which makes the technical solutions often expensive, prone to failure and maintenance intensive.

In building construction "robustness" and "adaptability" are usually most important for kinetic systems whereas the criteria "accuracy" or "velocity" are of less relevance. Movements of planar organs of many plants fulfil these criteria. Petals and leaves show robust motion principles which are crucial for many important biologically functions. These movements are typically based on locally adapted stiffness of their components and run without highly concentrated strain [1].

For a transfer into bio-inspired technical solutions for building constructions it is important to analyse quantitatively the patterns of movement and underlying principles of actuation and to understand the interplay with the structural set-up of the mechanisms. Plant movements can be actuated either hydraulically in an active manner by turgor changes that lead to reversible (nastic) movement or irreversible (tropistic) movement due to growth processes. In a hydraulically

passive way movements can be caused by hygroscopic swelling and shrinking of cells or tissues or by cohesion forces. Other mechanisms function by the release of stored elastic energy in pre-stressed structures or are initiated by external mechanical forces. An example for the latter is the deformation principle found in the „perch“ of the bird of paradise flower (*Strelitzia reginae*) which protects the stamen and ovary. Biomechanical tests proved that the perch can be released more than 3000 times without any evidence of structural or material fatigue, a behaviour which indicates the robustness of the biological system [1,2]. Based on the compliant flapping mechanism as biological concept generator a demonstrator (dimensions 2000 x 250 mm) composed of hand-laminated glass fibre-reinforced polymers (GFRP) was developed. The structure of the demonstrator has been fine-tuned by local adjustment of the orientation and layering of the fibres and was patented in 2011 as registered trade mark Flectofin® [3, 4].

Additional movements of curved two-dimensional plant structures are found in carnivorous plants. Examples are the active snap-traps found in Venus flytrap (*Dionea muscipula*) and waterwheel plant (*Aldrovanda vesiculosa*). The closing mechanism of the Venus flytrap involves snap-buckling of two lobes of the leaf that abruptly switch their curvature from concave to convex and functions as snap-trap [5,6] (fig. 1). In contrast, the closing of the leaf of the waterwheel plant involves a kinematic amplification which is caused by the bending deformation of the snap-trap midrib. Thereby its curvature changes during the trapping motion, whereas the concave shape of the trap lobes does not change

[6,7,8]. Further examples include flowers of the garden lily (*Lilium* ‘Casa-Blanca’) [9] and of *Ipomoea alba* [10] as well as trap door movement in various species of bladderworts (*Utricularia* spp.) [11].

Main aim of the research project is to improve the understanding of the mechanical principles that underlie the movements of plant surfaces by quantitatively analysing their biomechanics and by simulating the movement and actuation mechanisms with kinetic FE-models. The biological concept generators are selected such that diverse form generation patterns are included and various external and autonomous actuation mechanisms are covered. Variation of the geometrical and mechanical parameters in the FE-models will improve insights into the form-structure-function relationship of the biological role models and their evolutionary development (reverse biomimetics). In parallel, investigations will be carried out as to whether and, if so, how the mechanisms can be abstracted, scaled-up and integrated into kinetic structures for architecture that can be adapted to a wide range of geometrical and structural conditions. Technical implementation is based on the use of fibre-reinforced polymers with locally adapted stiffness through variation in fibre placement [1,4].

Fig. 1: Snap-trap of the Venus flytrap in open and closed state; picture of and cross-section through the trapping leaf.  
© Plant Biomechanics Group Freiburg

## **Verzweigungen und Achsen von ausgewählten Pflanzenarten als Ideengeber für hoch belastbare Verbindungen in verzweigten Baustrukturen**

T. Masselter<sup>1</sup>, M. Milwich<sup>2</sup> & T. Speck<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanischer Garten der Universität Freiburg,

<sup>2</sup>Institut für Textiltechnik, Faserbasierte Werkstoffe und Textilmaschinenbau, Universität Stuttgart & Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, <sup>3</sup>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“ – Projekt A06

Die Studie ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt basierend auf der Kooperation zwischen Biologen der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg und Ingenieuren der Universität Stuttgart vom Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (Direktor: Prof. Jan Knippers) und dem Institut für Textiltechnik, Faserbasierte Werkstoffe und Textilmaschinenbau (Direktor: Prof. Götz Gresser).

Hauptziel des TRR 141 A06 Projekts ist die Entwicklung von neuartigen, bionisch optimierten Verzweigungsknoten für tragende Faserverbundkonstruktionen in Architektur und Bauwesen (Abb. 1). Als biologische Ideengeber dienen Verzweigungen von baumförmigen und krautigen Monokotyledonen wie *Dracaena*, *Yucca*, *Nolina*, *Pandanus*, *Freycinetia* und *Semiarundinaria* (Abb. 2) mit ausgeprägter Faser(bündel-)Grundgewebe-Struktur, die sich deutlich von denen

anderer baumförmiger Pflanzen [1-3] unterscheiden. Andere interessante Ideengeber sind Seggen und Gräser wie *Carex* oder *Secale*, in denen die Blätter über eine stammumfassende Blattscheide angebunden sind. Zusätzlich werden spezielle Verzweigungen von Dikotyledonen (z.B. *Schefflera* und *Angelica*) und periphere Verstärkungsstrukturen, wie sie zum Beispiel in der Familie der Lippenblütler (Lamiaceae) vorkommen, untersucht werden. Diese Pflanzen sind evolutiv dazu ausgelegt (hohe) statische und dynamische Lasten bei geringem Eigengewicht zu tragen. Daher sind sie als Ideengeber für gewichtsreduzierte hochbelastete Verbindungen und Verzweigungsknoten in der Bautechnik gut geeignet. Wie es der Fall bei vielen Pflanzen ist, müssen technische Verzweigungsknoten sowohl steif und duktil als auch gut dämpfend sein um den komplexen Belastungen der Gesamtstruktur standzuhalten.



Abb. 1: Tragkonstruktion eines Daches als Beispiel für eine technische Umsetzung. © Plant Biomechanics Group Freiburg



Abb. 2: *Semiarundinaria* sp. als Beispiel für einen biologischen Ideengeber. Längsschnitt durch die Stamm-Astansbindung. Maßstab: 10 mm. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Üblicherweise werden für die Herstellung von verzweigten Verbindungen teure komplexe Formen für Beton oder Gussstahl benötigt oder diese werden aufwändig geschweißt. Im Rahmen des Projektes sollen neue Materialien, neue Strukturen und Formen sowie neue Herstellungsmethoden für bio-inspirierte verzweigte Konstruktionen entwickelt und kombiniert werden. Das neue Konzept basiert auf einer leichten Verzweigung aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) mit lastangepasster Faserorientierung. Die FVK Verzweigung dient sowohl als Außenform für eine Betonfüllung als auch zur Aufnahme der Torsions-, Zug- und Druckkräfte (Abb. 3, [4]). Zur Herstellung von hohlen FVK-Verzweigungsstrukturen können spezielle neue Web- und Flechttechniken verwendet werden. Eine neue Webtechnik gestattet das Verlegen der Fasern in Umfangs- und Längsrichtung. Neuartige Flechttechniken verlegen die Fasern doppelhelixförmig. Die Kombination der beiden Textilverfahren ermöglicht einen neuen Typus von faserverstärkten lasttragenden Hüllstrukturen in verzweigten

Architekturbetonstrukturen, welcher weitgehend dem Vorbild der Faserorientierung von hochgradig lastadaptierten biologischen Ideengebern folgt [5]. Weiteres Ziel der Untersuchungen im Projekt A06 ist auch die Verbesserung der strukturellen Verbindung zwischen der FVK-Hülle und der Betonfüllung. Voraussetzung für eine solche technische Umsetzung in der Architektur ist ein detailliertes Verständnis der basalen Mechanismen, welche der hohen Tragfähigkeit der Verzweigungsstrukturen zugrunde liegen. Dieses Verständnis soll auch durch Finite Elemente Simulationen von Modellen der biologischen Ideengeber unterstützt werden.

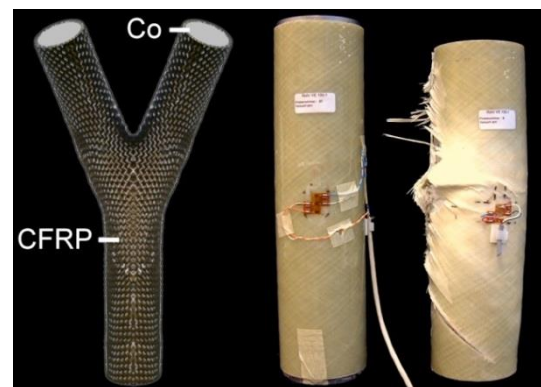


Abb. 3: Beton gefüllte FVK Rohre. Links: Neuartiger vom Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf entwickelte, biomimetische Verzweigung aus karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK), der mit Beton (Co) gefüllt werden kann (© Plant Biomechanics Group Freiburg). Rechts: Probe für erste Untersuchungen der CFK ummantelten Betonkörper vor dem Lasteintrag (links) und nach dem Versagen (rechts), (© ITKE Stuttgart).

#### Literatur

- [1] T. Masselter, S. Eckert & T. Speck, Beilstein J. Nanotechnol. 2, 173-174, (2011)
- [2] T. Masselter & T. Speck, in: A. George (ed.), Advances in Biomimetics, Intech, Rijeka, Croatia, 185-210, (2011)

- [3] H. Schwager, T. Haushahn, C. Neinhuis, T. Speck & T. Masselter, *Adv. Eng. Mater.* 12, B695-B698, (2010)
- [4] J. Knippers & M. Gabler, *Stahlbau-Kalender 2007*, Ernst & Sohn, Berlin, (2007)
- [5] 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)

### **Branchings and axes in selected plant species as concept generators for high load-bearing joints of branched building structures**

T. Masselter<sup>1</sup>, M. Milwich<sup>2</sup> & T. Speck<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Plant Biomechanics Group Freiburg, Botanic Garden of the University of Freiburg, <sup>2</sup>Institute for Textile Engineering, Fibre-based Materials and Textile Machine Construction, University of Stuttgart and Institute of Textile Technology and Process Engineering Denkendorf, <sup>3</sup>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“ – Project A06

The study represents an interdisciplinary research project based on the collaboration between biologists of the Plant Biomechanics Group from the University of Freiburg and engineers of the University of Stuttgart from the Institute of Building Structures and Structural Design (Head: Prof. Jan Knippers) and the Institute for Textile Engineering, Fibre-based Materials and Textile Machine Construction (Head: Prof. Götz Gresser).

Principal aim of the TRR 141 A06 project is the development of novel, biomimetically optimized branching joints for

fibre composite truss structures in architecture and constructional engineering (Fig. 1). Biological concept generators will be branchings of arborescent and herbaceous monocotyledons such as *Dracaena*, *Yucca*, *Nolina*, *Pandanus*, *Freycinetia* and *Semiarundinaria* (Fig. 2) which show pronounced fibre-matrix structures that are markedly different from those of other arborescent plants [1-3]. Other interesting concept generators are sedges and grasses such as *Carex* or *Secale* in which the leaves are connected via a leaf-sheath that encompasses the stem. Additionally, conspicuous branchings in dicotyledons (e.g. *Schefflera* and *Angelica*) and peripheral reinforcement structures as present in e.g. the mint family (Lamiaceae) will be investigated. These plants are evolutionary adapted to bear (high) static and dynamic loads with low self-weight. Therefore, they are well suited to serve as concept generators for weight-reduced highly loaded branching joints in constructional engineering. As is the case in many plants, technical branching joints need to be stiff, ductile, and well damping in order to withstand the complex loadings of the overall structure.

Typically, the fabrication of branched joints requires expensive complex frameworks for concrete or for cast steel or they are welded elaborately. Within the project, new materials, new structures and forms as well as new fabrication methods for bio-inspired branched constructions will be developed and combined. The novel concept consists of a light-weight branching made from fibre-reinforced polymers (FRP) with load-adapted fibre orientation. The FRP branching serves as outer framework for a concrete filling as well as for bearing torsion, tension and compression forces



(Fig. 3, [4]). Specialized new weaving technologies can be used to make hollow branched FRP-structures. A novel weaving technique allows laying the fibres in hoop direction and longitudinal direction. New braiding technologies lay the fibres in a double helix. The combination of the two textile processes enables a novel type of fibre-reinforced load-bearing hollow structures for branched concrete structures in architecture. This type widely follows the fibre orientation of the highly load-adapted biological concept generators [5]. A further goal of our research in the project A06 is the enhancement of the structural connection between the FRP jacket and the concrete filling. A prerequisite for such a technical implementation in architecture is a detailed understanding of the basic mechanisms underlying the high load-bearing capacity of branching joints. This understanding is aided by Finite Element simulations of models for the biological concept generators.

Fig. 1: Supporting structure of a roof as example for a technical implementation. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 2: *Semiarundinaria* sp. as example for a biological concept generator. Longitudinal section of stem-branch attachment. Scale bar: 10 mm. © Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 3: Concrete-filled FRP tubes. Left-hand side: novel biomimetic carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) branching developed by the ITV Denkendorf that can be filled with concrete (Co) (© Plant Biomechanics Group Freiburg). Right-hand side: specimen for preliminary test on FRP confined concrete before loading (left) and after failure (right), (© ITKE Stuttgart).

## Kontinuierliche Gebäudehüllenextrusion auf der Basis der Schneckenschalenbildung

V. Koldeisz<sup>1,2</sup>, S.Chandran<sup>2</sup>, G. Reiter<sup>1,2,3</sup> & R. Reiter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Freiburger Materialforschungszentrum (FMF), <sup>2</sup>Experimentelle Polymer Physik, Freiburg, <sup>3</sup>Freiburger 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

Inspiziert von den Prinzipien und Prozessen die bei der kontinuierlichen Schalenbildung von Landschnecken wirken, zielt dieses kürzlich genehmigte interdisziplinäre Forschungsprojekt darauf ab, einen Herstellungsprozess für architektonische Gebäudehüllen zu entwickeln, der auf der additiven Schichtung von polymeren Kompositmaterialien beruht. Im Fokus steht dabei die Herstellung komplexer Strukturen für Gebäudehüllen, bei welchen Funktionalität durch mikroskopische Oberflächenstrukturierung von polymeren Materialien erzielt wird. In diesem Zusammenhang dienen Landschnecken als hervorragender biologischer Ideengeber, da sie kontinuierlich aus einer räumlich begrenzten Drüse (Periostrakumgrube, Abb. 1) Materialeinheiten zur Schalenbildung absondern.

Der Extrusionsprozess des Periostrakums hat gewisse Ähnlichkeiten mit der 3D Drucktechnik, bei welcher das Material aus einem Druckkopf extrudiert wird dessen Bewegung und Materialzufuhr computergesteuert wird.

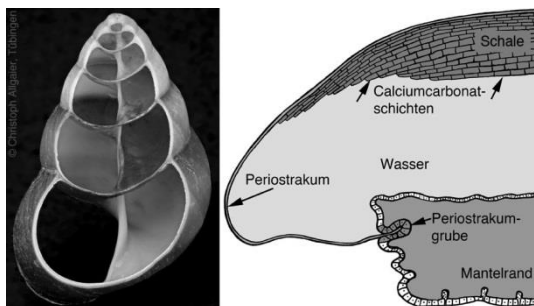


Abb. 1: Querschnitt durch eine Schneckenschale (links). Die Schale ist an den Schneckenkörper an der Öffnung links unten angeheftet. An der Unterkante dieser Öffnung wird das Schalenwachstum initiiert. Die Zeichnung rechts illustriert die Produktion von Periostrakum in der Periostrakum Grube, welches das Anfangsstadium im Wachstumsprozess darstellt. Das Bild wurde freundlicherweise von Dr. Christoph Allgaier zur Verfügung gestellt.

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

Die ersten Untersuchungen des Projektes konzentrieren sich auf die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des Periostrakums.

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.

Das ausgereifte Periostrakum besteht aus drei unterscheidbaren Schichten und dient letztendlich als Substrat für die Biomineralisierung und als äußere Schutzschicht der Schale. Periostrakum wird kontinuierlich produziert, wodurch ein fortlaufendes Wachstum der Schale gewährleistet wird.

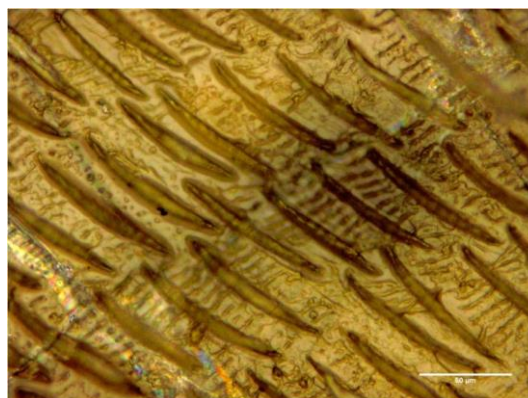


Abb. 2: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Stücks Periostrakum einer Landschnecken Spezies die deutlich eine periodische Mikrostruktur zeigt. Bildgröße: 286 µm x 212 µm. © Experimental Polymer Physics, Freiburg

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 zurzeit mittels AFM untersuchen um Aussagen über mechanische Eigenschaften in den optisch unterscheidbaren Regionen zu erhalten. Basierend auf diesen Ergebnissen werden polymere Komponenten mit vergleichbaren Eigenschaften gewählt, die dann als vernetzbare "Periostrakum Einheiten" in die Wasser-Luft Grenzfläche eines Langmuir Troges eingebracht werden. Die Langmuir

Technik erlaubt es, die laterale Anordnung dieser Einheiten zu kontrollieren und auf diese Weise eine ausgedehnte Periostrakumplatte zu erzeugen die als Substrat für den Aufbau weiterer Materialschichten dient.

#### 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)

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

V. Koldeisz<sup>1,2</sup>, S. Chandran<sup>2</sup>, G. Reiter<sup>1,2,3</sup> & R. Reiter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Freiburg Materials Research Centre, <sup>2</sup>Experimental Polymer Physics, Freiburg, <sup>3</sup>Freiburg 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

Inspired by the principles and processes involved in the continuous formation of the shell of land snails, this recently granted 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 polymeric composite mate-

rials. 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 Fig. 1). This extrusion process has some resemblance with technological 3D printing processes. Furthermore, shells are formed from patches of initially soft material that can be easily displaced in space, but have only one confined contact area to the shell. Based on these production mechanisms snails are capable of constructing a wide range of shell forms and surface textures through shaping and hardening of composite materials with both organic and inorganic layers

The initial studies of the project focus on identifying and measuring the mechanical properties of the periostracum. The periostracum is a polymer-like, thin organic film built from periostracal units secreted from 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 three distinguishable layers, serves as a substrate for bio mineralisation and also covers the shell as a protective layer. 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 land snails by our project partner, Dr. Christoph Allgaier (University of Tübingen, Palaeontology). The image clearly shows a periodic microstructure which we are presently investigating

## Highlights

by means of AFM to search for differences in mechanical properties. Based on these results, we will choose polymeric components having similar properties, in order to produce cross-linkable “polymeric periostracal units” at the air water interface. Their alignment will be tuned with the Langmuir technique to obtain an extended “polymeric sheet” that serves as a supporting matrix for deposition of further material.

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 within the periostracal groove which is the initial step in shell formation. Image with courtesy of Dr. Christoph Allgaier.

Fig.2: Optical microscopic image showing the periodic microstructure of periostracum, peeled from the shell of a land snail. Image size: 286  $\mu\text{m}$  x 212  $\mu\text{m}$ . © Experimental Polymer Physics, Freiburg.

## PROJEKTE

### SFB-TRR 141

#### **Biologisches Design und integrative Strukturen – Analyse, Simulation und Übertragung in die Architektur**

T. Speck<sup>1</sup>, J. Knippers<sup>2</sup> & K. Nickel<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE), Universität Stuttgart, <sup>3</sup>Angewandte Mineralogie, FB Geowissenschaften, Universität Tübingen

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

Der SFB-Transregio 141 (TRR 141) wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) mit Brief vom 22. Mai 2014 genehmigt und startete am 1. Oktober 2014 für die erste Förderperiode bis zum 30. Juni 2018. Der TRR 141 ist eine interdisziplinäre Forschungsinitiative basierend auf der Kooperation zwischen Wissenschaftlern/innen der Universitäten Stuttgart (Sprecher-Universität), Freiburg und Tübingen und den Satelliteninstitutionen Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart (SMNS) und Fraunhofer Institut für Bauphysik (IPB). Alle wissenschaftlichen Projekte des TRR 141 werden interdisziplinär von Naturwissenschaftlern (Biologen, Physikern, Chemikern, Geologen), Materialwissenschaftlern, Ingenieuren und Architekten durchgeführt. Jedes der Projekte wird von mindestens einem Architekten und/oder einem Inge-

nieur sowie einem Naturwissenschaftler/in geleitet. Eine detaillierte Darstellung der Struktur des SFB-TRR 141, der verschiedenen Projekte und der beteiligten Forscher/innen findet sich im Internet unter [www.trr141.de](http://www.trr141.de) (Abb. 1).



## SFB-TRR 141

Abb. 1: Logo des SFB-TRR 141.  
[www.trr141.de](http://www.trr141.de)

Von den 15 genehmigten interdisziplinären TRR 141 Projekten sind an 11 Projektleitern/innen (PIs) von der Universität Freiburg beteiligt. Von diesen Projekten sind sechs am Freiburger Zentrum für interaktive Materialien und bioinspirierte Technologien (FIT) angesiedelt und werden im FIT-Report 2014 durch kurze Projektbeschreibungen (Highlights) vorgestellt.

Der Fokus des Forschungsprogramms des TRR 141 liegt auf der Analyse der Konstruktionsprinzipien in der Biologie sowie auf deren Übertragung in Architektur und Bauingenieurwesen (Abb. 2). Lebewesen können sich durch die Prozesse der Mutation, Rekombination und Selektion an sich beständig ändernde Umweltbedingungen anpassen. In die-

sem evolutionären Anpassungsprozess ist die effiziente Nutzung natürlicher Ressourcen von wesentlicher Bedeutung und großem Vorteil. Biologische Strukturen sind aus einer geringen Anzahl meist leichter chemischer Elemente und basaler molekularer Verbindungen aufgebaut, die in der Regel aus der direkten Umgebung der Organismen stammen und unter Umgebungsdruck und -temperatur aufgebaut werden. Durch genetisch kontrollierte Selbstorganisation bilden Lebewesen hierarchisch organisierte, fein abgestimmte und hochgradig differenzierte Materialien und Strukturen, die komplexe hochgradig vernetzte Funktionen haben und gleichzeitig sich z. T. widersprechende Funktionen erfüllen müssen. In dieser Hinsicht unterscheiden sich biologische Strukturen grundlegend von den meisten

Bauwerken. Letztere werden aus einer großen Vielfalt von Materialien aufgebaut und bestehen aus individuellen nicht oder wenig vernetzten Komponenten. Diese sind unabhängig voneinander meist auf eine oder wenige Zielfunktionen hin optimiert, die für stationäre Randbedingungen festgelegt wurden. Die im Bauwesen verwendeten Materialien werden meist mittel sehr energieaufwändigen Methoden (hoher Druck und hohe Temperaturen) produziert. Designprinzipien wie Adaptivität, Multifunktionalität oder hierarchische Strukturierung wurden bisher in der Technologie und insbesondere auch im Bauwesen nur in sehr beschränktem Maße genutzt obwohl sie in der Natur omnipräsent sind [1,2].

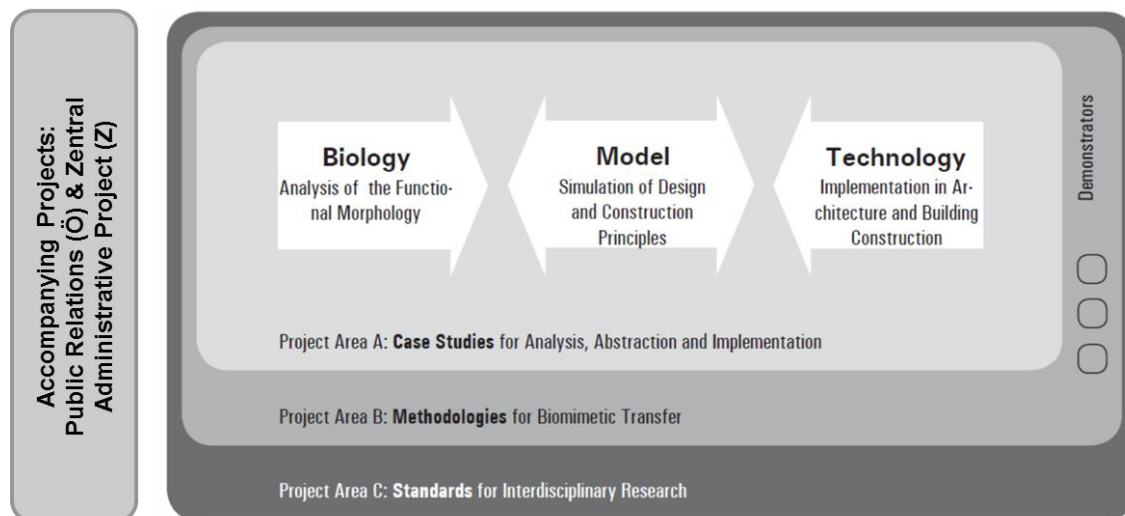


Abb. 2: Struktur des SFB-TRR 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ © ITKE Stuttgart & Plant Biomechanics Group Freiburg

In der Vergangenheit war ein zentrales Paradigma des Bauwesens, das im vollständigen Gegensatz zur Natur steht, die Nutzung so vieler identischer Teile wie möglich, die dann in einer so einfach wie möglichen Weise angeordnet wurden. In den letzten Jahren hat sich dies durch die Einführung und Nutzung computergesteuerter Herstellungsprozesse fundamental geändert. Hierdurch wird zum einen die Zahl möglicher geometrischer Formen drastisch erhöht. Zum anderen wird es möglich poröse, faserbasierte oder aus Multischichten aufgebaute Materialien mit lokal angepassten mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften zu produzieren. Darüber hinaus erlauben es aktuelle Entwicklungen in der Simulationstechnologie Multiskalen-Modelle zu erstellen und die Wechselwirkungen und das Zusammenspiel mechanischer Phänomene auf und über verschiedene Hierarchieebenen zu analysieren und zu verstehen. Außerdem wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl neuer quantitativer Analysemethoden für die Untersuchung des Form-Struktur-Funktions-Zusammenhangs biologischer Konstrukte auf verschiedenen hierarchischen Ebenen ermöglichen etabliert. Das hierdurch mögliche vertiefte Verständnis biologischer Strukturen führt im Zusammenspiel mit den neuen Simulations- und Produktionsmethoden zu neuen vielversprechenden Optionen für den Transfer dieser Ergebnisse und Konstruktionsprinzipien in makroskalige Bauwerke und andere Technologiefelder [1,3,4].

Das gesamte Programm des TRR 141 ist als Dialog aufgebaut: die funktionell wichtigen Eigenschaften der biologischen Systeme werden quantitativ analysiert und in Modelle abstrahiert, welche die interessierenden Eigenschaften und

die diesen zugrundeliegenden Konstruktionsprinzipien repräsentieren. Diese Modelle dienen als Grundlage für Simulationen der Funktionsmorphologie und der mechanischen Eigenschaften und liefern die Basis für die Übertragung in die Technik (Abb. 3). Im Prozess der Reversen Bionik stellen diese Simulationsergebnisse den Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dar und erlauben ein vertieftes Verständnis der biologischen Systeme.

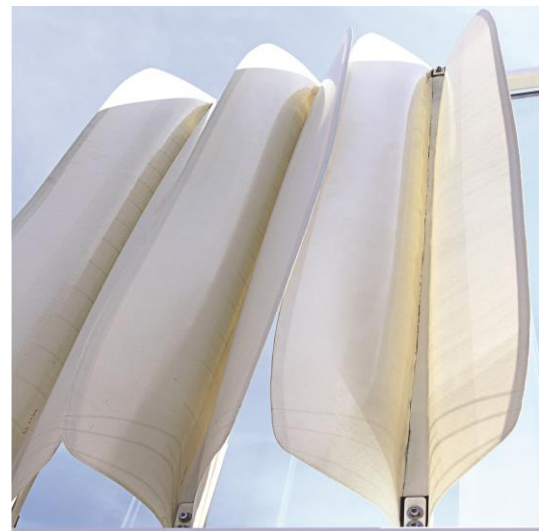


Abb. 3: Biologischer Ideengeber Blüte der Paradiesvogelblume (*Strelitzia reginae*) (oben, © Plant Biomechanics Group Freiburg) und Modell des Doppel-Flectofin® eines bionischen Fassaden-Verschattungssystems (© Julian Lienhard, ITKE Universität Stuttgart)

Kernfragen der Forschungsinitiative im Rahmen des TRR 141 sind:

1. Wie kann die Struktur hierarchisch aufgebauter, multifunktionaler und adaptiver biologischer Systeme modelliert und simuliert werden? Die Computersimulationen sollen ein vertieftes Verständnis der biologischen Strukturen und Systeme und ihrer evolutionären Entstehung ermöglichen. Parallel dazu dienen sie als Grundlage für die Übertragung in technische Anwendungen für neuartige Entwicklungen im Bereich des Bauwesens [4,5].

2. Wie können computergesteuerte Herstellungsmethoden für den Transfer von Konstruktionsprinzipien aus der Biologie in makroskalige Baukonstruktionen genutzt werden? Ziel ist nicht nur eine Erhöhung der Effizienz von Baustrukturen sondern auch die Entwicklung und Integration neuartiger Eigenschaften wie Multifunktionalität, hierarchische Strukturierung und/oder Adaptivität, welche bisher im Bauwesen nicht oder nur in sehr eingeschränktem Rahmen genutzt wurden [1,2,4].

3. Unter welchen Bedingungen können Abstraktion und Transfer von Konstruktions- und Funktionsprinzipien aus der Biologie zu einer nachhaltigeren Technologieentwicklung beitragen, in welcher nicht nur vorteilhafte Funktionen, sondern auch ökologisch vorteilhafte Aspekte des biologischen Vorbilds übertragen werden? Für aktuelle Entwicklungen im Bereich des Bauwesens sind Ressourcen-Effizienz, nachhaltige Nutzung von Baumaterialien und geschlossene Materialkreisläufe, wie sie in vielen biologischen Systemen verwirklicht sind, von stetig zunehmender Bedeutung [5,6].

In der ersten Förderphase des TRR 141 konzentrieren sich die Forschungsaktivitäten hauptsächlich auf Materialien und Strukturen in Biologie und Bauwesen. In den anschließenden Förderphasen wird die Perspektive erweitert werden auf eine stärker holistische Analyse biologischer Prozesse und ihres Übertragungspotentials für Architektur und Bauwesen und wird Aspekte wie beispielsweise Energiemanagement und Energiekonversion beinhalten.

### Literatur

- [1] J. Knippers & T. Speck, *Bioinspir. Biomim.* 7, DOI:10.1088/1748-3182/7/1/015002, (2012)
- [2] T. Speck, J. Knippers & O. Speck, *Archit. Design*, Special Issue 'Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational', (2015) [in print]
- [3] S. Schleicher, J. Lienhard, S. Poppinga, T. Speck & J. Knippers, *Computer-Aided Design* 60, 105-117, DOI.org/10.1016/j.cad.2014.01.005, (2014)
- [4] S. Ahlquist, T. Kampowski, O. Torghebehi, A. Menges & T. Speck, *Computer-Aided Design* 60, 84-104, DOI.org/10.1016/j.cad.2014.01.013, (2014)
- [5] F. Antony, R. Grieshammer, T. Speck & O. Speck, *Bioinspir. Biomim.* 9, DOI:10.1088/1748-3182/9/1/016013, (2014)
- [6] O. Speck, F. Antony & T. Speck, *Das bionische Versprechen*, In: *Prototype Nature* (eds. A. Bernotat & J. Bertling), (2015) [in press]



## **Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture**

T. Speck<sup>1</sup>, J. Knippers<sup>2</sup> & K. Nickel<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), University of Stuttgart

<sup>3</sup>Applied Mineralogy, Department of Geosciences, University of Tübingen

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

The Cooperative Research Center 141 (CRC 141) has been approved by the German Research Foundation (DFG) with letter from May 22<sup>nd</sup> 2014 and started on October 1<sup>st</sup> 2014 for its first funding period lasting until June 30<sup>th</sup> 2018. CRC 141 represents an interdisciplinary research initiative based on the cooperation between scientists from the universities of Stuttgart (coordinating university), Freiburg and Tübingen and the satellite institutions Stuttgart State Museum of Natural History (SMNS) and Fraunhofer Institute for Building Physics (IPB). All scientific projects of the CRR 141 are handled by natural scientists (biologists, physicists, chemists, geologists), material scientists, engineers and architects on an interdisciplinary basis. Each project is headed up by at least an architect and/or an engineer and also a natural scientist. A more detailed de-

scription of the structure of CRC 141, of the various projects, and of the scientists involved can be found in the internet ([www.trr141.de](http://www.trr141.de), Fig. 1).

From the 15 approved interdisciplinary CRC 141 projects, 11 run with contribution of principles investigators from the University of Freiburg. Six of these projects are located at the Freiburg Centre for Interactive Materials and Bioinspired Technologies (FIT) and are introduced in short highlight descriptions in the FIT-report 2014 in addition to this general introduction to the central ideas of CRC 141.

The research program of CRC 141 focuses on design and construction principles in biology and on their transfer to architecture and building construction (Fig. 2). Living beings adapt to a constantly changing environment through mutation, recombination and selection. In this process, the efficient usage of natural resources is a significant evolutionary advantage and therefore a guiding principle. It leads to structures made of only a limited number of chemical elements and basic molecular components that are directly available as part of a natural material cycle and processed under ambient conditions. Through genetically controlled self-organization, living organisms form hierarchically organized finely tuned and highly differentiated materials and structures that have multiple networked functions which occasionally fulfil contradictory functional requirements. In this respect, biological structures differ fundamentally from most building constructions. The latter are made of a large variety of materials and take the form of individual components. These are independently optimized for a few target functions under stationary boundary

conditions. Materials are typically produced with highly energy consuming methods of manufacturing. Design principles such as adaptivity, multifunctionality or hierarchical structuring have so far been used in technology and especially in building construction only to an extremely limited extent, even though they are omnipresent in nature [1,2].

In total contrast to all natural structures, a central paradigm of building construction has been to use as many identical parts as possible and to arrange them as simply as possible. During the last few years, this idea has changed fundamentally through the introduction of computational manufacturing processes. These not only increase the possible level of geometric differentiation, but also allow for porous, multi-layered or fibre-based materials with locally adjusted mechanical, physical and chemical properties. In addition, recent developments in simulation technologies have focused on multi-scale models and the interplay of mechanical phenomena at various hierarchical levels. Together with a multitude of new quantitative methods in biology for structural investigations covering diverse hierarchical levels, this progress in computational simulation and fabrication offers new options for the analysis of biological structures and for the transfer of their design and construction principles to the macro-scale of building construction and other fields of technology [1,3,4].

The entire program of CRC 141 is conceptualized as a dialogue: the functionally important features of the biological systems are abstracted in a model representing the properties of interest and the underlying design principles. This model serves as a basis for simulating functional morphology and biomechan-

ics and provides the basis for technical implementation (Fig. 3). In the process of 'reverse biomimetics', the results represent the foundations for further investigations and a more detailed understanding of the biological systems.

The key questions of research initiative of the CRC 141 are:

1. How can the structure of hierarchically organized, multifunctional and adaptive biological systems be modelled and simulated? The computational simulation will enable a deeper understanding of biological structures and systems and of their evolutionary development. In parallel, it will serve as a basis for transfer to technical applications and for novel developments in the field of building construction [4,5].

2. How can computational fabrication methods be used to transfer the design and construction principles of nature to the macro-scale of building construction? Our aim is not only to increase the efficiency of building structures but also to develop new features such as multifunctionality, hierarchical structuring or adaptivity that until now have not been used in building construction [1,2,4].

3. Under what conditions do the abstraction and transfer of structural and functional principles from biology lead to a more sustainable technology that 'inherits' not only the functional but also the ecologically beneficial properties of biological role models? The development in building construction is increasingly directed towards resource efficiency, sustainable use of building materials and closed material loops, which are self-evident for most natural systems [5,6].

In the first funding period the research program will focus mainly on materials and structures in biology and building construction. In the subsequent periods, the perspective will be widened to a more holistic analysis of biological processes and their potential for a transfer in architecture and building construction and will also include aspects of energy management and energy conversion.

Fig. 1: Logo of CRC-TRR 141.  
www.trr141.de

Fig. 2: Structure of the Cooperative Research Center 141 „Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“. © ITKE Stuttgart & Plant Biomechanics Group Freiburg

Fig. 3: Biological concept generator bird-of-paradise flower (*Strelitzia reginae*) (above, © Plant Biomechanics Group Freiburg) and model of the double flectofin® a biomimetic façade shading system (below, © Julian Lienhard, ITKE University of Stuttgart).

## IRTG

### **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

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 ver-

stehen, 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: Logo des IRTG-SoMaS.  
© IRTG-SoMaS  
[www.softmattergraduate.uni-freiburg.de/](http://www.softmattergraduate.uni-freiburg.de/)

Die erste Förderperiode des IRTG hat im Oktober 2010 begonnen und wird im März 2015 enden. Das Forschungsprogramm der zweiten Förderperiode, die im April 2015 startet, umfasst drei eng miteinander verbundene Themen mit insgesamt 19 Dissertationsprojekten, die ein breites Spektrum verschiedener Aspekte im Bereich weicher Materie repräsentieren. Im Jahr 2015 werden mehr als 24 Doktoranden/-innen in diesen bilateralen Projekten, in denen sie jeweils eine deutsche und französische Betreuerin oder einen deutschen und französischen Betreuer haben, forschen. 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, Sommerschulen und Vorträgen von Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftlern.

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.

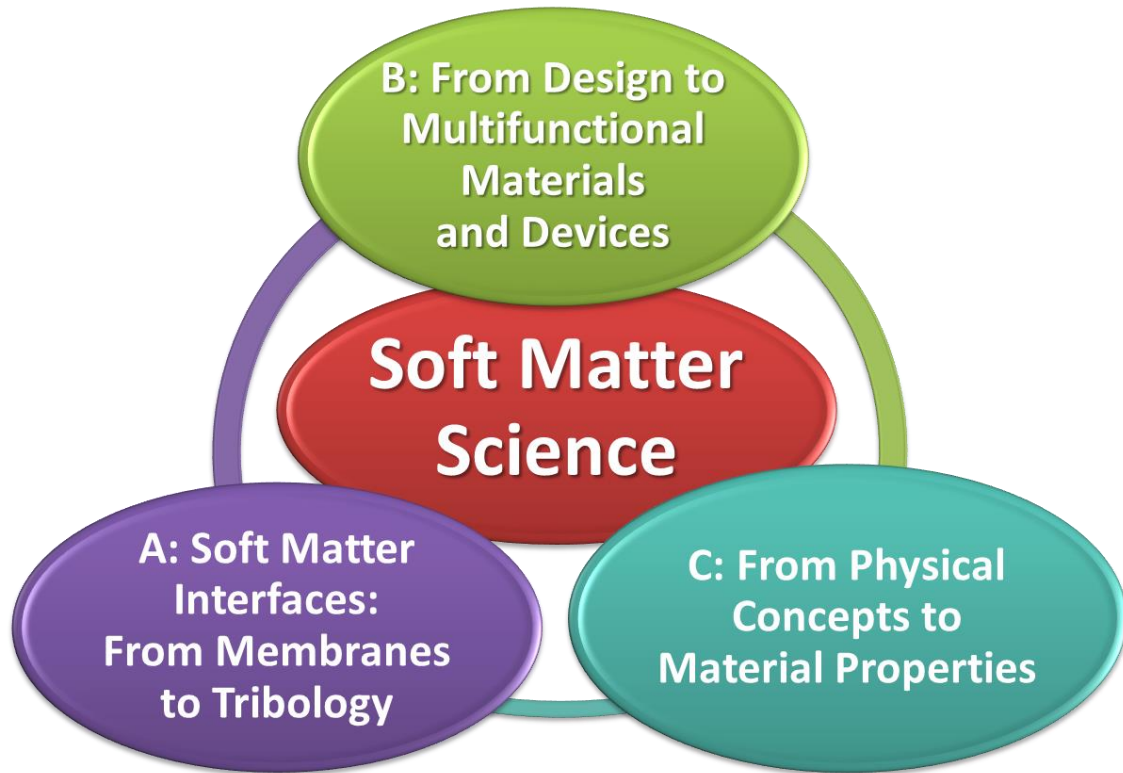


Abb. 2: Die drei Themenbereiche des IRTG-SoMaS. © IRTG-SoMaS

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):

- A. Soft matter interfaces: from membranes to tribology
- B. From design to multifunctional materials and devices
- C. From physical concepts to material properties

Die Untersuchung fortschrittlicher Funktionswerkstoffe auf Basis von Soft Matter-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.

### **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

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 Universities 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 has started in October 2010 and will end in March 2015. The research programme of the second funding period (starting 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 will be 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 work-

shops, summer schools, and seminars given by experts from outside the IRTG.

The 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.

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.

Fig. 1: Logo des IRTG-SoMaS. © IRTG-SoMaS  
[www.softmattergraduate.uni-freiburg.de/](http://www.softmattergraduate.uni-freiburg.de/)

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

## FIT-KOLLOQUIUM 2014

### Programm

Klein-Kolloquium FIT zur Akquirierung von Mitgliedern  
Freitag, den 21.03.2014 um 14:00 Uhr im Seminarraum B des FMFs

- |           |   |
|-----------|---|
| 14:00 Uhr | Begrüßung durch den Geschäftsführenden Direktor Herrn Mülhaupt  |
| 14:08 Uhr | Karen Lienkamp<br>Self-regenerating Functional Surfaces and Devices   |
| 14:16 Uhr | Simon Thiele<br>Nanotomographische Ansätze für energierelevante Materialien   |
| 14:24 Uhr | Anayancy Osorio-Madrado<br>Bioinspired cellulose nanofiber-reinforced chitosan hydrogels for intervertebral disc tissue engineering                       |
| 14:32 Uhr | Jan Behrends<br>Mikrosysteme und Funktionsmaterialien –Integrierte bioinspirierte Systeme (BITS) – Optische Analyseverfahren                              |
| 14:40 Uhr | Thomas Speck<br>Transregio  |
| 14:48 Uhr | Peter Woias<br>Charakterisierung, Optimierung und Modellierung leitffähiger, dehnbarer und optisch transparenter Silber-Nanodraht-Netzwerke               |
| 14:56 Uhr | Günter Reiter<br>Weiche Materie: Von molekularen Kräften zu neuen Materialien   |
| 15:04 Uhr | Rolf Mülhaupt<br>Responsive und adaptive makromolekulare Schicht-und Gradientensysteme  |
| 15:12 Uhr | Marie-Pierre Laborie<br>LIGNOSIT: Lignozellulose-NanocompoSit mit innovativem Verarbeitungskonzept zur Verbesserung der physikalischen Leistungsfähigkeit |



## PUBLIKATIONEN / PUBLICATIONS

AHLQUIST, S.; KAMPOWSKI, T.; TORGHABEHI, O.; MENGES, A.; SPECK, T. (2015): Digital framework for the computation of complex material and morphological behavior of biological and technical systems. – Computer-Aided Design (Special Issue on Material Ecology: Design and Computational Issues), 60: 84-104. (invited publication)  
DOI.org/10.1016/j.cad.2014.01.013

ANTONY, F.; GRIEßHAMMER, R.; SPECK, T.; SPECK, O. (2014): Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure. – Bioinspir. Biomim., 9.

BAUER, G.; C. FRIEDRICH, C.; GILLIG, C.; VOLLRATH, F. SPECK, T.; HOLLAND, C. (2014): Investigating the rheological properties of native plant latex. – Journal of The Royal Society Interface, 11 (90). DOI.org/10.1098/rsif.2013.0847

CANTOW, H.-J.; MÜLHAUPT, R. (2013): Hermann Staudinger and Polymer Research in Freiburg. – Hierarchical Macromolecular Structures: 60 Years after the Staudinger Nobel Prize I, Adv Polym Sci: 261: 21–38. (book published 14<sup>th</sup> January 2014)

KERSCHER, B.; SCHÜLER, F.; APPEL, A.-K.; SCHADT, K.; MÜLHAUPT, R. (2013): Nanostructured Polymeric Ionic Liquids. – Hierarchical Macromolecular Structures: 60 Years after the Staudinger Nobel Prize II, Adv Polym Sci: 262: 431-446. (book published 14<sup>th</sup> January 2014)

ROWE, N.P.; SPECK, T. (2014): Stem biomechanics, strength of attachment, and developmental plasticity of vines and lianas. – In: The Ecology of Lianas (eds. S. Schnitzer, F. Bongers, R. Burnham & F. Putz), 323 – 341. Wiley-Blackwell, Chichester.  
DOI: 10.1002/9781118392409.ch23 (invited publication)

SCHLEICHER, S.; LIENHARD, J.; POPPINGA, S.; SPECK, T.; KNIPPERS, J. (2015): A methodology for transferring principles in plant movements to elastic systems in architecture. – Computer-Aided Design (Special Issue on Material Ecology: Design and Computational Issues), 60: 105-117. (invited publication)  
DOI.org/10.1016/j.cad.2014.01.005

SPECK, O.; LUCHSINGER, R.; RAMPF, M.; SPECK, T. (2014): Selbstreparatur in Natur und Technik. – Konstruktion, 9: 72-75 + 82. (invited publication)

SPECK, T. (2014): Bio-inspirierte Materialien und Strukturen aus Kunststoff. – Innovationstag Kunststoff 2014: Trends im Bereich Kunststoff: schneller - dünner - leichter, 36 pp. INNONET, Süddeutsches Kunststoffzentrum Horb.

SPECK, T.; THIELEN, M.; SPECK, O. (2014): Biomimetic materials: long-lasting and self-repairing. – In: K. van Breugel & E.A.B. Koenders (eds.), Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Ageing of Materials & Structures (AMS 2014): 27 – 30. Delft, The Netherlands. (printed and electronically)

ZIELKE, L.; FALLISCH, A.; PAUST, N.; ZENGERLE, R.; THIELE, S. (2014): Tomography based screening of flow field / current collector combinations for PEM water electrolysis, RSC Adv 4, 58888-58894.

ZIELKE, L.; HUTZENLAUB, T.; WHEELER, D.R.; CHAO, C.-W.; MANKE, I.; HILGER, A.; PAUST, N.; ZENGERLE, R.; THIELE, S. (2014): Three-Phase Multiscale Modeling of a LiCoO<sub>2</sub> Cathode: Combining the Advantages of FIB-SEM Imaging and X-Ray Tomography, Adv. Energy Mater.

## PRÄSENTATIONEN / PRESENTATIONS

*(\*V) eingeladene Vorträge, (V) Vorträge, (P) Poster mit Kurzvortrag, (Uni) Vorträge bei internen Uni-Kolloquien und Ringvorlesungen (der/die Vortragende ist unterstrichen), (Ind) Vermittlung wissenschaftlicher Erkenntnisse in der Industrie, (Öff) Vermittlung wissenschaftlicher Erkenntnisse in der Öffentlichkeit sowie für Bildung und Lehre, (Wiss) Wissenschaftliche Fachvorträge*

(\*V-Öff) T. Speck: 3,8 Milliarden Jahre Evolution nutzen – was wir von der Natur für die Technik lernen können. – Naturforschende Gesellschaft in Basel, Basel (17.12.2014).

(\*V-Ind) T. Speck: Bio-inspirierte Materialien und Strukturen aus Kunststoff Bionik. – Innovationstag Kunststoff 2014, Horb (26.11.2014).

(\*V-Wiss/Uni) T. Speck: Actual trends in biomimetics. – 1. Doktorandenworkshop des SFB-TRR 141, Freudenstadt (13.11.2014).

(V-Wiss) O. Speck: Das bionische Versprechen: Ein Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung. – 7. Bionik-Kongress Bionik: Patente aus der Natur, Bremen (25.10.2014).

(P-Wiss) M. Caliaro, T. Speck & O. Speck: Adaptive Steifigkeit bei krautigen Pflanzen – Vorbild für die Technik. – 7. Bionik-Kongress Bionik: Patente aus der Natur, Bremen (25.10.2014).

(V-Wiss) T. Speck: Attachment organs in climbing plants – structure, mechanics and inspiration for biomimetic applications. – New perspectives on climbing plants, Linnean Society of London, London (23.10.2014).

(V-Uni) T. Speck: Botanik: Funktionelle Morphologie und Bionik. – Studienabschlussfeier der Studiengänge Staatsexamen Pharmazie und B.Sc. Pharmazeutische Wissenschaften, Universität Freiburg, Festvortrag (17.10.2014).

(V-Uni) O. Speck & T. Speck: Bioinspirierte Selbstreparatur. – FMF-Kolloquium, Schluchsee (13.10.2014).

(\*V-Öff/Uni) T. Speck: Moderne Hightech-Forschung in Botanischen Gärten. – Botanische Gärten in Wissenschaft und Gesellschaft, Ulm (17.09.2014).

(\*V-Öff/Wiss) T. Speck: Von der Klette zum Klettverschluss: Bionik – wie wir der Natur die Technik der Zukunft abschauen. – Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte e.V. (GDNÄ) – Die Wissenschaftsgesellschaft, Mainz (13.09.2014).

(\*V-Ind/Wiss) T. Speck: Roadmap of over 15 successful years of biomimetics in Germany. – KARIM Interreg IVB Event on Biomimikry in France and Europe, Paris (08.09.2014).

(\*V-Ind/Öff) T. Speck: Biodiversity of plants – a source of inspiration for biomimetics: the role of Botanic Gardens. – 2<sup>nd</sup> Biomimikry Europe: Innovation and Finance Summit, Zürich (04.09.2014).

(\*V-Uni) T. Speck: Functional morphology and biomechanics of plant movements. – LMU, München (09.07.2014).

(\*V-Uni/Wiss) T. Speck: Bionik im Botanischen Garten: Moderne Forschung in einer Traditionsreichen Einrichtung.- Woche der Botanischen Gärten / 100 Jahre Botanischer Garten in Herdern (14.06.2014).

(\*V-Wiss) T. Speck, M. Thielen & O. Speck: Biomimetic materials: long-lasting and self-repairing. – 1st International conference on Ageing of Materials and Structures (AMS'14), TU Delft, Niederlande, (28.05.2014).

(V-Wiss) T. Speck, M. Thielen & O. Speck: Bioinspired Damping Structures and Self-healing Materials. – First Sino-germane Bilateral Symposium “Bioinspired Materials Science and Engineering – Biofabrication, Biomaterials and Biomolecules, Wuhan, China (13.05.2014).

(\*V-Uni) O. Speck: Selbstreparatur in Natur und Technik. – Vorlesungsreihe VorBild Natur, Halle (20.05.2014)

(\*V-Uni) T. Speck: Von Pflanzen lernen für die Technik der Zukunft. – Vorlesungsreihe VorBild Natur, Halle (29.04.2014).

(\*V-Öff) T. Speck: Bionik – Von Pflanzen lernen für innovative Technologien. – Flying Science - Urpflanzen, Symmetrie, Wachstum, Basel, Schweiz (11.04.2014).

(V-Wiss) T. Speck: From biological to biomimetic materials & structures: Tapping biodiversity. – Winterschool SPP 1420 & DGM, Bio-inspired Materials, International School and Conference on Biological Materials Science, Potsdam (18.03.2014).

(\*V-Wiss) T. Speck: Biomimetics: Future engineering inspired by nature. – Satellite Symposium Biomimetics, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan (06.02.2014).

(\*V-Wiss) T. Speck: Bioinspired structural materials – smart, multi-functional and hierarchically structured. – Structural Materials: the Link between Materials and Mechanics, National Institute of Materials Science (NIMS), Tsukuba, Ibaraki, Japan (05.02.2014).

(V-Öff) T. Speck: Bionik als Ideenbörse. – Evangelische Akademie Baden, Vom Homo faber zum Homo creator? Bionik und synthetische Biologie“, Bad Herrenalb (01.02.2014).

## IMPRESSUM

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

Redaktion: Dr. Olga Speck

Druck: Druckerei der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



