



Bionische Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Botanischen Garten Freiburg



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

UNI
FREIBURG

Botanischer Garten der Universität Freiburg
Schänzlestraße 1
79104 Freiburg
Tel.: 0761 2032872
Fax.: 0761 2032880
www.botanischer-garten.uni-freiburg.de

Öffnungszeiten:

Freiland	Täglich	08:00 bis 18:00 Uhr
Gewächshäuser	Montag bis Donnerstag Sonn- und Feiertag	12:00 bis 16:00 Uhr 14:00 bis 16:00 Uhr (Letzter Einlass jeweils 15:45 Uhr)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Inhalt

Einleitung	4
Schockabsorbierende Transportpalette	5
Technischer Pflanzenhalm	7
Optimierung von Verankerungssystemen durch Anwendung bioinspirierter Prinzipien	9
GrowBots: Pflanzen-inspirierte Roboter	12
Bionische Schutzausrüstung für Sport, Freizeit und Arbeit	15
Selbstreparierende Schäume	18
Bionische Fassadenverschattung: Flectofin & Flectofold	20
Optimierung des Nassbremsverhaltens von Reifen	24
Haushaltsgeräte (EGO)	26
Literatur zum Weiterlesen	28

Einleitung

An den Botanischen Garten und den Lehrstuhl für "Botanik: Funktionelle Morphologie und Bionik" ist die Plant Biomechanics Group Freiburg angegliedert. Neben Grundlagenforschung in den Bereichen Funktionelle Morphologie, Biomechanik sowie Evolution und ökologische Bedeutung pflanzlicher Strukturen, ist die Bionik fester Bestandteil im Forschungsportfolio des Botanischen Gartens. Da es hierbei um die Untersuchung, Abstraktion sowie technische Umsetzung und Implementierung von Konstruktions- und Funktionsprinzipien aus der Natur in bionische Produkte geht, werden diese Forschungsprojekte häufig in Kooperation mit Industriepartnern durchgeführt.

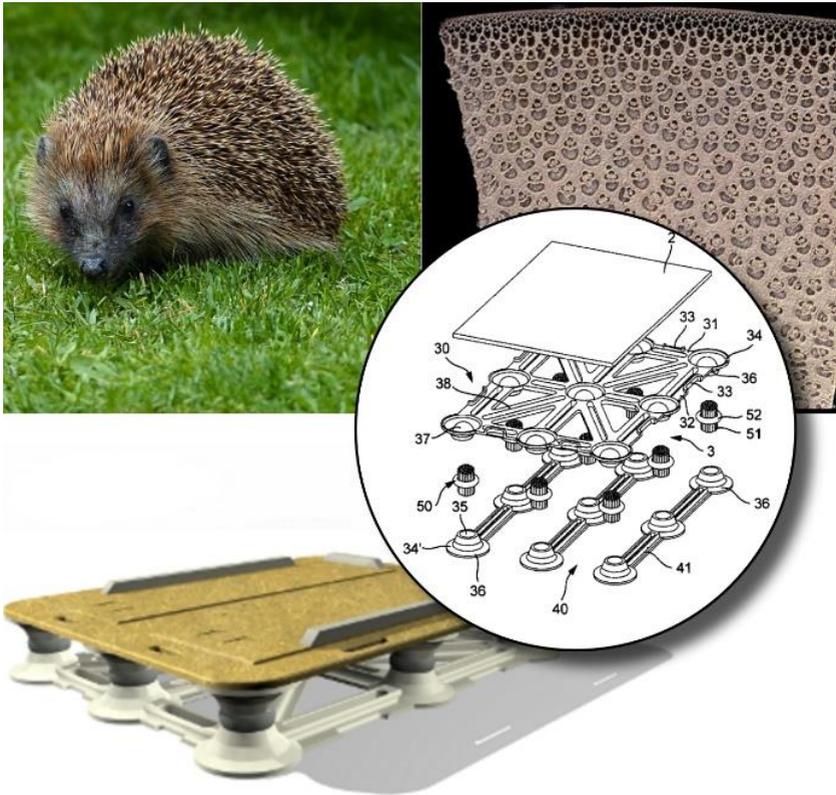
Solche Projekte können durch öffentliche Mittel (co-)finanziert sein, z.B. durch die Europäische Kommission (EU), verschiedene Bundesministerien (wie BMBF oder BMWi) und Landesministerien (wie MWK BW oder WM BW) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), oder aber die Kosten werden in Gänze vom jeweiligen Industriepartner getragen. Seit 2005 konnten so ca. 3 Mio € an Forschungs- und Entwicklungsmitteln von Industriepartnern eingeworben werden (von insgesamt über 13,5 Mio € an Drittmitteln zu Forschungsprojekten zum Thema Bionik). Im Folgenden werden einige ausgewählte Kooperationsprojekte vorgestellt, andere hingegen unterliegen aus naheliegenden Gründen (noch) der Geheimhaltung. Die Themengebiete, die im Botanischen Garten bearbeitet werden, erstrecken sich von verschiedenartigen Anwendungen in der Automobilindustrie und im Maschinenbau über Architektur bis hin zur sogenannten weißen Ware wie z.B. Waschmaschinen, Trockner oder Geschirrspüler. Am Ende der Informationsschrift sind weiterführende Veröffentlichungen zu den jeweiligen Beispielen bionischer Entwicklungen zusammengestellt.^{1 & 2)}

Schockabsorbierende Transportpalette

Zusammen mit der Rittal GmbH & Co. KG, einem der weltweit größten Anbieter und Entwickler von Schaltschränken und IT-Infrastruktur, dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf (ITV) und der Hochschule für Gestaltung Offenbach hat die Plant Biomechanics Group eine schockabsorbierende Palette für den Transport von empfindlichen Gütern, wie z.B. Schaltschränken mit bereits eingebauter, hochsensibler Elektronik, entwickelt.

Diese, von Grund auf neu entwickelte und designte bionische Transportpalette besteht aus einer Fußplatte, neun in die Podestfüße integrierten Dämpfermodulen und einer Deckplatte. Hierbei wurden gleich mehrere Wirkprinzipien unterschiedlicher biologischer Vorbilder übertragen. So ist die Form der Podestfüße, die als Aufnahme für die Dämpfermodule und Anbindung an die Deck- bzw. Bodenplatte dienen, mit einem von Prof. Claus Mattheck (Karlsruher Institut für Technologie) entwickelten Optimierungsverfahren (CAO-Methode) gestaltet, das die Wachstumsgesetze von Bäumen zum Vorbild hat. Die Deckplatte wurde durch den inneren Aufbau von Bambus, Pfahlrohr und der Mittelrippe von Bananenblättern inspiriert und ist auf Leichtbau optimiert, um das Gesamtgewicht der Palette und somit letztendlich die Transportkosten niedrig zu halten. Die eigentliche Stoßdämpfung, also die Dissipation von kinetischer Energie, erfolgt in den Dämpfungsmodulen. Diese haben unter anderem Igelstacheln und deren Einbettung in die zähe Haut zum Vorbild. Zum einen sind die Stacheln an sich bereits energieabsorbierend, zum anderen wirkt aber auch deren Einbettung in die Hautmuskulatur stoßdämpfend. Darüber hinaus wird so verhindert, dass Igel von den eigenen Stacheln „aufgespießt“ werden. Das zugrundeliegende Wirkprinzip wurde übertragen indem steife Faserverbundstäbchen in eine elastische Elastomermatrix eingebettet wurden. Die Stäbchen wirken dabei als lasttragende Biegefedern, die in Interaktion mit der umgebenden Matrix, auftretende Vibrationen und Stöße dämpfen, indem sie deren Energie über Reibung in thermische Energie umwandeln.^{1 & 3)}

Bei der Entwicklung der bionischen schockabsorbierenden Transportpalette wurde Wert auf eine gute Ökobilanz gelegt. So sind die aus Naturfasern und Polymilchsäure bestehenden Deck- und Basisplatten vollständig rezyklierbar und die Dämpfermodule sind so ausgelegt, dass sie mehrfach wiederverwendet werden können. Für die Entwicklung der bionischen schockabsorbierenden Transportpalette wurden die beteiligten Forscher*innen mit dem „Best of Certificate Materialica Design+Technology Award 2011 - Category C02-Efficiency“ ausgezeichnet.



Links oben: Igel, dessen Stacheln und deren Verankerung in der zähen Haut als biologisches Vorbild fungierten. Rechts oben: Teil eines Querschnitts durch einen Bambusstängel. Mitte: Patentzeichnung der bionischen Transportpalette. Unten: Gerendertes 3D-Modell der bionischen Transportpalette.

Technischer Pflanzenhalm

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenprogramm „Innovationen als Schlüssel für Nachhaltigkeit in der Wirtschaft“ geförderte Verbundprojekt „Entwicklung von neuen Faserverbundprofilen mit hohem Leichtbaupotenzial und Knickfestigkeit nach dem Vorbild von Pflanzenhalmen“ hatte als Zielsetzung pflanzliche Leichtbauprinzipien zu abstrahieren und in technische Bauteile zu übertragen. Um das notwendige Vorwissen und die Fachkompetenz in den Bereichen Biologie und Ingenieurwissenschaften zu bündeln, wurde – wie in bionischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten üblich – ein aus mehreren Projektpartnern bestehendes Konsortium gebildet. Neben der Plant Biomechanics Group des Botanischen Gartens der Universität Freiburg waren in diesem Konsortium das Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf, das Composite Technology Center Stade GmbH sowie die Ensinger GmbH Technische Kunststoffe und Coperion Werner und Pfleiderer eingebunden.

Faserverbundwerkstoffe bestehen im Allgemeinen aus verstärkenden Fasern, die insbesondere in Zugrichtung hochbelastbar sind, und einer sogenannten druckstabilen Matrix, in die die Fasern eingebettet sind. Durch die Kombination werden bei geringer Masse mechanische Eigenschaften erreicht, die weitaus besser sind, als die der einzelnen Bestandteile. In der Natur sind solche Faserverbundwerkstoffe allgegenwärtig. Insbesondere Pflanzenhalme und -stämme weisen Eigenschaftskombinationen auf, die auch für technische Anwendungen wünschenswert, oft aber nur schwer realisierbar sind. Sie sind leicht, stabil, biegesteif, weisen hohe Fehler- und Versagenstoleranz auf und sie haben gute Dämpfungseigenschaften. Das Geheimnis hierfür liegt in der hierarchischen Strukturierung, d.h. einer Strukturierung auf unterschiedlichen Längenskalen, die von der makroskopischen Ebene bis hin zur mikroskopischen und molekularen Ebene reicht. Diese Strukturierung umfasst 11 Größenordnungen, vom bis zu 100m hohen Baumstamm bis in den (Sub-)Nanometerbereich des molekularen Aufbaus der Zellwände. Auch Gradienten spielen eine wichtige Rolle, um zum Beispiel Steifigkeitssprünge zwischen Faser und Matrix zu vermeiden. Solche Steifigkeitssprünge sind bei technischen Faserverbänden gefürchtet, da sie zu vorzeitigem Ver-

sagen durch Delamination oder „Verbretterung“ führen können, eine Versagensform, die bei biologischen Faserverbundstrukturen aufgrund des graduellen Steifigkeitsübergangs zwischen Fasern und Grundgewebe (Matrix) so gut wie nie auftritt.

Umgesetzt wurden diese und andere Erkenntnisse durch eine als Flecht-pultrusion bekannte Technik, die es erlaubt Fasern in einer Matrix einzubetten und dabei deren Verlaufswinkel, die Anzahl der Fasern und eine graduelle Änderung der Faserdicke ganz genau steuern zu können. Das Ergebnis ist der als „technischer Pflanzenhalm“ bekannte und patentierte bionische Leichtbau-Faserverbundstab, der mit dem Tech-textil – Innovationprize 2007 - New Materials ausgezeichnet wurde.^{1 & 4)}



Oben links: Winterschachtelhalm (*Equisetum hyemale*).
 Oben rechts: Pfahlrohr (*Arundo donax*).
 Mitte: Patentzeichnung des Technischen Pflanzenhalms.
 Unten: Technischer Pflanzenhalm.

Optimierung von Verankerungssystemen durch Anwendung bioinspirierter Prinzipien

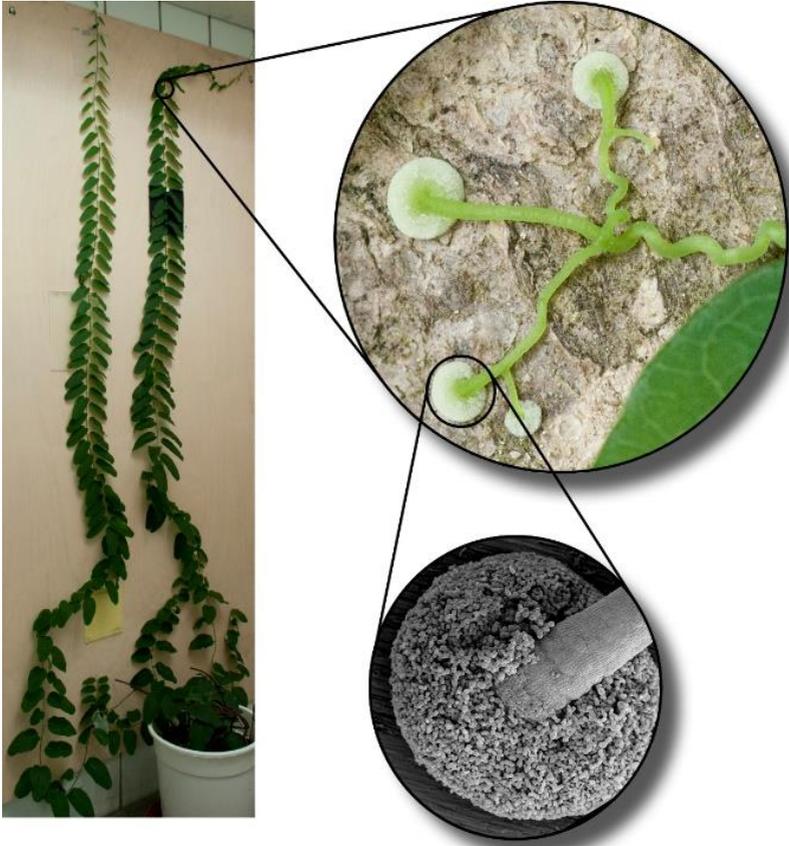
Zusammen mit Ingenieuren*innen und Materialforscher*innen vom Institut für Angewandte Materialien des Karlsruher Instituts für Technologie und der Fischerwerke GmbH & Co.KG, mit Chemikern*innen des Instituts für Makromolekulare Chemie der Universität Freiburg und mit Physikern*innen des Instituts für Experimentelle Polymerphysik der Universität Freiburg, haben Forscher*innen der Plant Biomechanics Group Freiburg erforscht wie Verankerungssysteme und insbesondere Schwerlastverbindungen über bionische Ansätze verbessert werden können.



Inspiration hierzu findet man im Pflanzenreich insbesondere bei Kletterpflanzen, welche sich durch Ausbildung verschiedenartiger Haftorgane an Stützstrukturen verankern und an diesen emporwachsen können, ohne selbst einen material- und somit energieaufwendigen, massiven Stamm ausbilden zu müssen. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Haftsystem der Passionsblume *Passiflora discophora* untersucht. Dieses besteht aus einer verzweigten Ranke mit einer spiralisierten Hauptachse und Nebenachsen, an deren Ende mehrere Haftpads ausgebildet sind. Das Zusammenspiel von Ranken und Haftpads sorgt dafür, dass sich die Pflanze extrem zuverlässig an unterschiedlichsten Untergründen verankern kann. Je nach Substratbeschaffenheit haften die Haftpads mit einer flachen „Sohle“ und einer abgeschiedenen Klebsubstanz an der Oberfläche des Substrats, oder sie verankern sich indem sie in Vertiefungen des Substrats einwachsen und dort ein kallusartiges Gewebe bilden. Dieses füllt die Kavitäten vollständig aus und sorgt somit für eine ideale Verankerung. Die spiralisierten Ranken wirken wie gedämpfte Federn und dienen hauptsächlich der Energieabsorption bei plötzlich auftretenden Lasten.

Auch wenn die Haftranke nach abgeschlossener Wachstumsperiode austrocknet und abstirbt, bleibt deren Funktion vollständig erhalten. Dies hat den Vorteil, dass die Verankerung der Pflanze ohne weiteren Ressourcen- und Energieverbrauch auskommt. Basierend auf diesen Funktionsprinzipien wurden verschiedene Ideen für eine Umsetzung in bio-inspirierte technische Verankerungssysteme abgeleitet, die vom Industriepartner weiterentwickelt werden.⁵⁾

Darüber hinaus liefern solche pflanzlichen Verankerungssysteme auch wichtige Anregungen für die Entwicklung einer völlig neuartigen Klasse von bio-inspirierten „Soft Robots“, die sich wie wachsende Lianen fortbewegen. Dieses, von der EU unter der Bezeichnung „GrowBot“ geförderte Projekt, wird in einer internationalen Kooperation mit Forschern*innen verschiedenster Fachrichtungen bearbeitet.⁶⁾



Links: Die Passionsblume (*Passiflora discophora*) wächst unter kontrollierten Bedingungen in der Phytokammer der Plant Biomechanics Group. Rechts oben: Haftsystem bestehend aus einer Hauptranke, die sich in mehrere Nebenranken aufspaltet. Rechts unten: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der kallosartigen Oberseite eines Haftpads.

GrowBots: Pflanzen-inspirierte Roboter

Wenn man an Roboter denkt, fallen einem unweigerlich humanoide, also menschenähnliche Roboter ein, welche uns schwere und/oder monotone Arbeiten erleichtern oder abnehmen sollen. Daneben gibt es jedoch eine Vielzahl an unterschiedlich gestalteten Robotern – man denke nur an Industrieroboter – die zum Teil hochspezialisiert sind. Viele Lösungen und Errungenschaften im Bereich der Robotik sind vom Menschen oder anderen Tieren inspiriert. Es gibt andererseits nur sehr wenige Roboter die von Pflanzen inspiriert sind, vermutlich weil diese sich augenscheinlich nicht bewegen. Das stimmt jedoch nicht, Pflanzen bewegen sich durchaus. So bewegen sie sich beispielsweise durch Wachstum und erobern so neue Lebensräume. Allerdings sind die Wachstumsvorgänge typischer Weise recht langsam und werden deshalb von uns Menschen nicht als (dynamische) Bewegungen wahrgenommen.

Als Teil eines internationalen Konsortiums hat es sich die Plant Biomechanics Group Freiburg, im Rahmen des von der EU geförderten Projekts GrowBot, zum Ziel gemacht pflanzeninspirierte Roboter zu entwickeln. Beteiligte Partner sind: das Istituto Italiano di Tecnologia, das Gran Sasso Science Institute und die Scuola Superiore di Studi Universitari e di Perfezionamento Sant'Anna aus Italien, das Helmholtz-Zentrum Geesthacht und die Universität Freiburg aus Deutschland, die Universität Tel Aviv aus Israel, das CNRS aus Frankreich, sowie die beiden Unternehmen Linari Engineering (Italien) und Arkine Technologies / Bioo (Spanien).⁶⁾

Kletterpflanzen dienen in diesem Projekt als Inspirationsquelle um Roboter zu entwickeln, die klettern können und dabei Hindernisse überwinden und größere Abstände überbrücken können und damit Herausforderungen lösen, die von Robotern mit Rädern oder Beinen nicht bewältigt werden könnten. Hierzu untersucht die Plant Biomechanics Group Freiburg zum einen den Form-Struktur-Funktions-Zusammenhang von Suchertreibern, die es Lianen erlauben neue Trägerpflanzen zu besiedeln. Diese Suchertreibe winden sich häufig umeinander und bilden hierdurch eine Art „Zopf“, wodurch ihre selbsttragende Reichweite erhöht wird.



Oben: Spiralisierte, senescente (abgestorbene) aber noch voll funktionsfähige Ranke von *Passiflora x belotii* 'Kaiserin Eugenie', mit der sich die Pflanze an ihrem Substrat – in diesem Fall einem Bambusstängel – verankert hat.

Mitte: Konzeptzeichnung eines GrowBot, welche die verschiedenen Funktionen eines solche GrowBots aufzeigt (© Barbara Mazzolai – www.growbot.eu). Unten: Umeinander gewunden zopfartige Suchertriebe von *Aristolochia macrophylla*.

Zum andern werden die Anhaft- und Verankerungsstrukturen von Kletterpflanzen, wie zum Beispiel den Passionsblumen, untersucht. Die spiralisierten Ranken der Passionsblumen bilden sich erst aus, nachdem sie an einem Substrat Halt gefunden haben. Da sie wechselständig am Stängel angeordnet sind, wird dieser sozusagen „festgezurr“, wodurch er das eigene Gewicht nicht mehr selbstständig tragen muss und weiter emporklimmen kann. Die federartigen Strukturen bieten zudem eine gewisse Flexibilität und sind gleichzeitig in der Lage Energie aufzunehmen, d.h. zu dämpfen, und dadurch ein Abreißen bei mechanischer Belastung, zum Beispiel durch Windböen, zu verhindern.

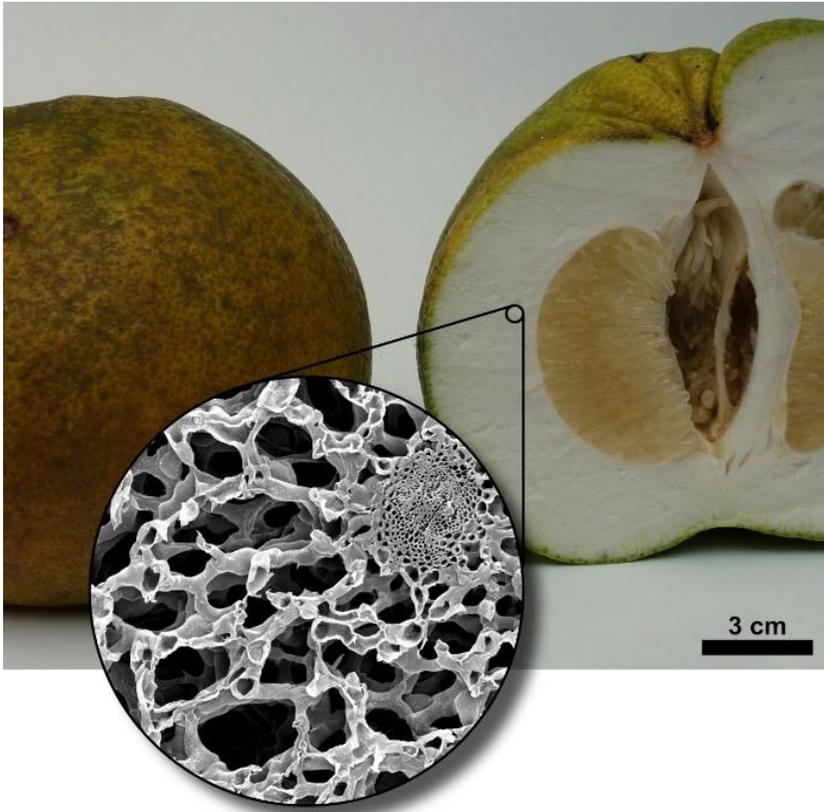
Durch neueste 3D-Drucktechniken, die wichtiger Teil der pflanzeninspirierten Roboter-Entwicklung sind, sind diese neuartigen Roboter – ähnlich wie Pflanzen beim Wachstum – in der Lage sich selbst zu Drucken, und hierdurch zu wachsen, sich adaptiv zu verankern und in unwegsames Gelände vorzudringen und dieses mittels im Roboter integrierten Sensoren zu erkunden.

Bionische Schutzausrüstung für Sport, Freizeit und Arbeit

Dieses vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt hatte als Ziel, durch die Nutzung technologischer und materialbasierter Entwicklungen innovative bionische Sicherheitsprodukte (z.B. für Gelenk- oder Kopfschutz) zu erarbeiten. Das Vorhaben wurde von sieben weltweit anerkannten Konsortialpartnern (Adidas AG, BMW Group, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth, Ortema GmbH, Uvex Sports GmbH & Co. KG, Plant Biomechanics Group Freiburg) mit Kompetenzen in den benötigten wissenschaftlichen und praxisbezogenen Forschungs- und Entwicklungsfeldern durchgeführt. Expertenwissen wurde in diesem Projekt in den Bereichen biologische Materialforschung und bionische Umsetzung, Schäume, Schaumfunktionalisierung, Textiltechnik, Sport, Schutzsysteme und Bekleidung benötigt. Das Projektkonsortium wurde durch einen assoziierten Partner (Deutscher Skiverband), sowie durch im Unterauftrag eingebundene Unternehmen (Innovationsmanufaktur GmbH, Phoenix GmbH & Co.KG, Thermoplast Composite GmbH) unterstützt.

Als biologisches Vorbild wurde in diesem Projekt unter anderem die Pomelo (*Citrus maxima*) untersucht, die eine der größten Zitrusfrüchte darstellt. Ihrer dicke, schaumartig strukturierte und durch ein Netzwerk von Leitbündeln verstärkte Schale bewahrt die Frucht bei einem Fall aus mehreren Metern Höhe und anschließendem Aufprall auf den Boden wirkungsvoll vor dem Aufplatzen, wodurch ein Eindringen von Keimen und Pilzsporen verhindert wird. Hierdurch bleibt die Keimfähigkeit der in der Frucht enthaltenen Samen erhalten und deren Verbreitung durch Tiere bleibt gewährleistet.

Zunächst wurde die Energiedissipationsfähigkeit der Pomeloschale, sowie ihre Fähigkeit Kraftspitzen zu mindern, untersucht. Hierzu wurden mithilfe eines Korkbohrers zylindrische Proben aus der Schale entnommen, die auf einem Kraftsensor platziert wurden. Anschließend wurde ein Aufprall simuliert, indem ein Fallgewicht aus einer vorher definierten Höhe auf die Probe fallen gelassen wurde.



Die Pomelo (*Citrus maxima*) hat eine extrem dicke Schale, die schaumartig strukturiert ist, wie auf der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme (runder vergrößerter Schalenausschnitt) erkennbar ist. Interessanterweise bestehen die einzelnen Stege der Schaumstruktur aus lebenden Zellen. Rechts oben ist in dem vergrößerten Bildausschnitt der Querschnitt eines Leitbündels zu erkennen.

Zum einen konnte so die durch die Probe durchgeleitete Kraft bestimmt werden, was wichtige Einblicke in ihre Schutzwirkung ermöglicht. Zum anderen wurde der Aufprall auch mittels Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt, was eine nachträgliche, detaillierte Analyse der Verformung der Pomeloschalenprobe erlaubte. Wie sich herausstellte, weist der weiße,

schaumartige Teil der Pomeloschale – das sogenannte Albedo – ein Verhalten auf, das als auxetisch bezeichnet wird. Das heißt, im Gegensatz zu den meisten anderen Materialien, wird es nicht breiter wenn es durch den Aufprall zusammengepresst wird, sondern es wird schmaler, d.h. zieht sich zusammen. Bei einem Aufprall bewirkt dieses Verhalten, dass die auftretenden Kräfte auf ein größeres Schalenvolumen verteilt werden und somit die lokale Schutzwirkung erhöht wird. Dieser Effekt wird durch das dreidimensionale Netzwerk von Leitbündeln noch zusätzlich verstärkt^{1 & 7)}.

Das Verteilen der bei einem Aufprall lokal wirkenden Kräfte konnte ebenfalls in Helmen durch Einbringen von Faserverstärkungen in die innere Dämpfungsschicht erreicht werden. Hierzu wurde unter anderem ein Verbundmaterial aus Expandiertem Polystyrol (EPS) und Abstandsgewebe verwendet. Sowohl Tests von Materialproben der Dämpfungsschicht im Labormaßstab, als auch von ganzen Helmen nach europäischer Sporthelmnorm EN 1684 haben gezeigt, dass die bionische Optimierung die Dämpfungseigenschaften – insbesondere im Minustemperaturbereich - signifikant verbessert.



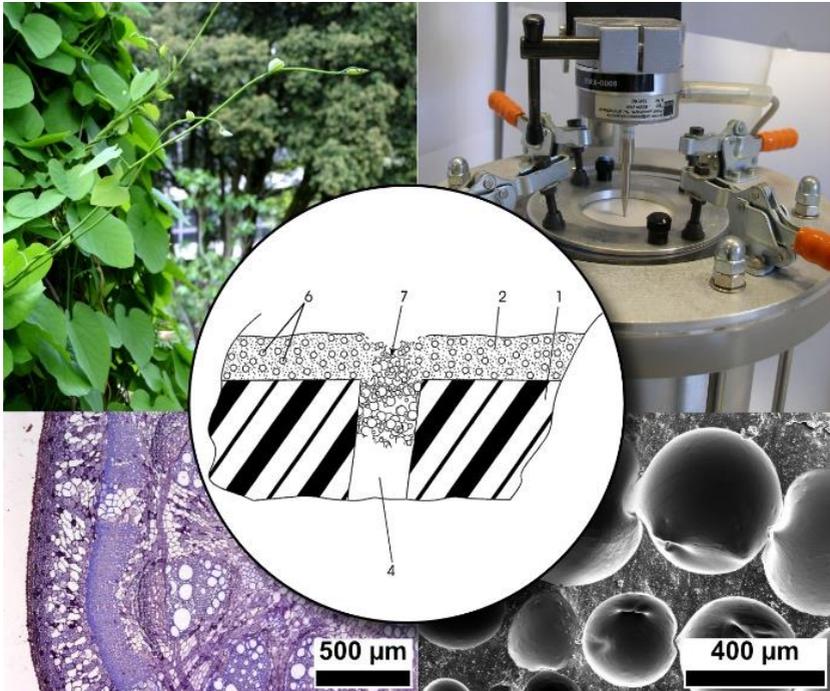
Links: Herstellungsprozess eines bionischen Helms bei der Firma Uvex. Mitte: bionischer, faserverstärkter Helm. Rechts: Testvorrichtung zum normierten Testen von Helmen.

Selbstreparierende Schäume

Ein Paradebeispiel in Sachen Leichtbau sind pneumatische Konstruktionen, also Strukturen, die mit Luft gefüllt und durch den entstehenden Überdruck unter Vorspannung gehalten werden. Problematisch wird es, wenn infolge von Löchern Leckagen auftreten, durch die Luft entweicht. In Kooperation mit der Firma Prospective Concepts AG und dem Center for Synergetic Structures der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) hat die Plant Biomechanics Group sich der Aufgabe angenommen, eine bionische, selbstreparierende Beschichtung für pneumatische Systeme wie Schlauchboote oder die ultraleichten, in der Architektur zum Einsatz kommenden Tensairity®-Strukturen zu entwickeln.

Biologisches Vorbild war die Amerikanische Pfeifenwinde *Aristolochia macrophylla*, deren junger Stängel aus einem zentralen Markzylinder besteht, der von Leitgewebe, dem parenchymatischen Rindengewebe, einem geschlossenen, peripheren Ring aus verholztem Festigungsgewebe und der Epidermis umschlossen ist. Das mit zunehmendem Alter eintretende sekundäre Dickenwachstum, insbesondere der Leitgewebe, führt zu hohen radialen und tangentialen Spannungen im Festigungsgewebering, wodurch letztendlich Risse entstehen. Wenn diese durch innere Wachstumsprozesse entstandenen (inneren) Risse bis zur Stängelaußenseite durchlaufen würden, wären sie ideale Einfallspforten für Bakterien und Pilzsporen. Die Pflanze ist jedoch in der Lage diese Risse zunächst zu versiegeln, indem unter Überdruck (Turgor) stehende Parenchymzellen aus der Rinde in diese Risse quellen und diese sehr schnell versiegeln. In einem anschließenden, wesentlich länger dauernden Prozess werden die Risse dann repariert, indem sich diese Parenchymzellen teilen, verholzen und so die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften (teilweise) wieder herstellen. Die Umsetzung erfolgte indem eine geschlossenenporige Polyurethan-Schaumschicht auf die Innenseite der Membran des pneumatischen Systems (im Falle der Tensairity®-Strukturen ein PVC-beschichtetes Polyestergerewebe) aufgebracht und unter Überdruck von 1,0 bis 1,5 bar polymerisiert wurde. Dadurch konnte, zusätzlich gefördert durch die Krümmung der aufgebla-

senen Membran, eine Reparaturreffizienz von bis zu 0,998 erreicht werden, d.h. über 99% der Löcher werden völlig versiegelt und bei den restlichen Löchern wird der Luftausstrom um das 1000fache reduziert.^{1 & 8)} Vom Industriepartner Rampf Giessharze GmbH & Co KG wurde basierend auf diesen Ergebnissen ein bionischer Reparaturschaum entwickelt und unter dem Markennamen Raku-PUR 33-1024-3 vertrieben.



Links oben: Amerikanische Pfeifenwinde *Aristolochia macrophylla*. Rechts oben: Testapparatur zur Bestimmung der Selbstreparaturqualität anhand des Luftstroms der aus der durchstochenen Membran entweicht. Links unten: Querschnitt von einem Stängel der Liane *Aristolochia macrophylla* mit durch Rindenparenchymzellen verschlossenen Rissen im äußeren Ring des festigenden Gewebes. Rechts unten: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen des bionischen, selbstreparierenden geschlossenenporigen Schaums.

Bionische Fassadenverschattung: Flectofin & Flectofold

Eine Schwachstelle vieler Fassadenverschattungssysteme sind deren Scharnier-Gelenke, die häufig klemmen, kaputtgehen oder zumindest sehr wartungsintensiv sind. Im Pflanzenreich hingegen gibt es eine Vielzahl an Bewegungstypen, die gänzlich ohne Gelenke auskommen. Die Konsortialpartner des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „Biegsame Flächentragwerke auf der Grundlage bionischer Prinzipien“ haben sich zur Aufgabe gemacht neuartige, gelenklose und von Pflanzenbewegungen inspiriert elastische Bewegungskinematiken für den Architekturbereich zu entwickeln. Zusammen mit dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart, dem Institut für Textile Verfahrenstechnik Denkendorf (ITV) und der Firma Clauss Markisen, hat die Plant Biomechanics Group zunächst den sogenannten Flectofin nach dem Vorbild der Paradiesvogelblume (*Strelitzia reginae*) entwickelt. Die Blüte der Strelitzie bietet nektarsuchenden Vögeln eine Sitzstange aus zwei violetten, zu einem oben offenen Zylinder verwachsenen Blütenblättern, die sich durch das Gewicht des Vogels nach unten biegt. Hierdurch klappen gleichzeitig, die flächigen Lamina der beiden Blütenblätter nach horizontal außen, wobei die Staubblätter frei werden. Hierdurch kann der Pollen auf den Körper des besuchenden Vogels anhaften und kann bei dessen Besuch einer anderen Blüte auf deren Narbe übertragen werden. Der dieser Kinematik zugrundeliegende und als „Biegedrillknicken“ bezeichnete elastische Mechanismus wurde in den sogenannten Flectofin® übertragen. Bei diesem Verschattungssystem kann durch Biegung eines stabförmigen Rückgrads ein flächiges Bauteil graduell und stufenlos verstellt werden, ohne dass gleitende Teile eines Scharniergelenks benötigt werden.^{1 & 9)}



Oben: Paradiesvogelblume (*Strelitzia reginae*) mit den beiden violetten zu einer Sitzstange verwachsenen Blütenblättern.
Mitte: Patentzeichnung der bionischen Fassadenverschattung Flectofin®.
Unten: Expo-Themen-Pavillon "One Ocean" auf der Weltausstellung 2012 in Yeosu (Südkorea), mit einer, auf dem Flectofin® basierendem bionischen Fassaden-Verschattungssystem.

Ein zweites, als Flectofold bezeichnetes, Verschattungssystem wurde im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs TRR 141 „Biological Design and Integrative Structures“ nach dem Vorbild der karnivoren Wasserfalle (*Aldrovanda vesiculosa*) und der Streifenwanze (*Graphosoma italicum*) entwickelt. An diesem Projekt waren neben der Plant Biomechanics Group das Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), das Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT), das Institut für Baustatik und Baudynamik (IBB) (alle Universität Stuttgart), das Institut für Evolution und Ökologie (Universität Tübingen), sowie die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) beteiligt.

Eines der Projektziele war es ein System zu entwickeln, welches das Verschatten von doppelt gekrümmten Außenfassaden ermöglicht. Die Fallenhälften der ca. 3 mm großen Fallen verformen sich, anders als die der nah verwandten Venusfliegenfalle, während dem Zuschnappen nicht. Vielmehr biegt sich die Mittelrippe, die beide Hälften verbindet, durch. Eine verhältnismäßig kleine Durchbiegung der Mittelrippe reicht dabei aus, um eine große Bewegung der Fallenhälften zu bewirken. Die Übertragung dieses, als „curved line folding“ bekannten Bewegungsprinzips, führte letztendlich zur Entwicklung des Flectofold-Verschattungssystems, mit dem man selbst komplexeste Gebäudegeometrien lückenlos verkleiden und verschatten kann.¹⁰⁾



Links: Die fleischfressende Wasserfalle (*Aldrovanda vesiculosa*). Rechts: Flectofold Demonstrator in der Baubionik-Ausstellung im Naturkundemuseum Schloss Rosenstein in Stuttgart (2018).

Neben der hohen Funktionalität und des geringen Wartungsbedarfs zeichnen sich die beiden bionischen Fassadenverschattungen Flecto-fin® und Flectofold durch eine hohe Ästhetik aus, was ein weiterer Vorteil bionischer Entwicklungen sein kann.

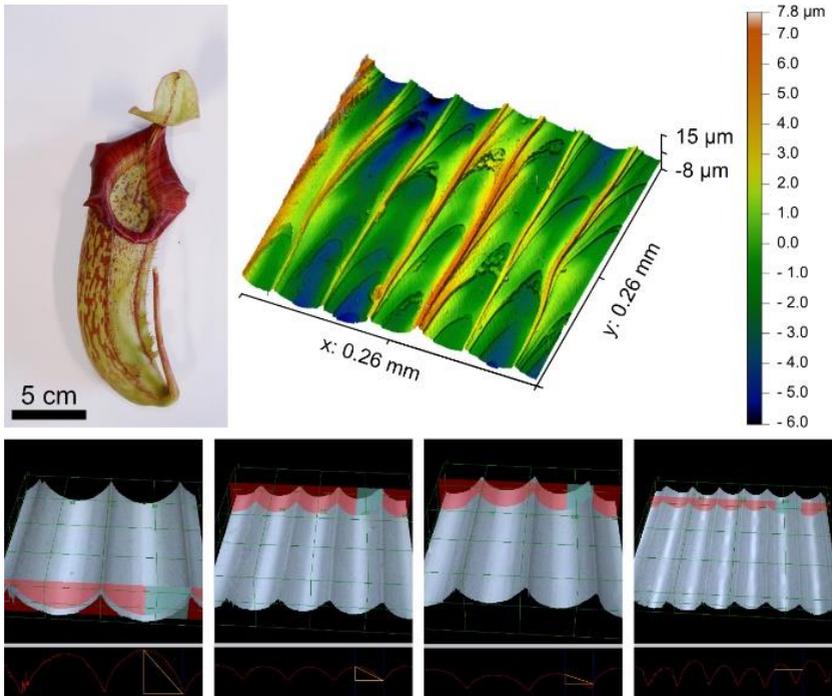
Optimierung des Nassbremsverhaltens von Reifen

Eine Herausforderung für PKW-Reifen sind insbesondere regennasse Straßen, die nicht nur häufig zu Aquaplaning führen, sondern auch ganz allgemein das Bremsverhalten negativ beeinflussen. In Kooperation mit der Firma Bridgestone aus Japan, dem weltweit größten Reifenhersteller für Pkw, Busse, Lkw und Spezialfahrzeuge, hat die Plant Biomechanics Group untersucht inwiefern sich Reifen, die nach wie vor zu einem Großteil aus Naturkautschuk bestehen, bionisch optimieren lassen.

Das Verhalten von Wasser auf einer Oberfläche wird durch deren Benetzbarkeit bestimmt, die sowohl von der Materialchemie als auch von der Oberflächenstrukturierung abhängt. Hydrophile, also wasserliebende Oberflächen kann man durch die richtige Oberflächenstrukturierung noch hydrophiler machen – sie werden dann superhydrophil – und hydrophobe Oberflächen können entsprechend superhydrophobisiert werden. Letzteres sieht man z.B. bei Blättern der Lotusblume (*Nelumbo nucifera*) oder der Kapuzinerkresse (*Tropaeolum* sp.). Bei ihnen bildet das Wasser aufgrund der Oberflächenspannung perfekt runde Tropfen und kann so einfach abperlen. Das gegenteilige Beispiel findet man auf dem Rand der fleischfressenden Kannenpflanzen. Trifft ein Wassertropfen auf diesen als Peristom bezeichneten Rand, spreitet es nahezu perfekt und benetzt somit den gesamten Kannenrand, wodurch Insekten, die versuchen darauf zu laufen, den Halt verlieren, abrutschen und in die Kanne stürzen.

Ziel dieser Kooperation mit der Firma Bridgestone war es, das Profil der Lauffläche eines PKW-Reifens so zu strukturieren, dass das Wasser besser abgeführt werden kann. Hierzu wurde unter anderem untersucht wie die Oberflächeneigenschaften der Peristoms von *Nepenthes* zustande kommen und welcher Einfluss die Mikrostrukturierung und das Material dabei jeweils haben. Neben dem biologischen Vorbild wurden hierzu auch 3D-gedruckte Prototypen untersucht, deren Benetzbarkeit z.B. durch Kontaktwinkelmessungen bestimmt wurde. Ziel ist es basierend auf diesen Untersuchungen, die Vertiefungen in der Lauffläche von PKW-Reifen in einer Weise mikroskopisch so zu strukturieren, dass der

sich zwischen nasser Straßenoberfläche und Lauffläche des Reifens bildende Wasserfilm besser abgeführt wird. Hierdurch könnte das Fahr- insbesondere aber das Bremsverhalten der Reifen auf nassen Straßen wesentlich verbessert werden .¹¹⁾



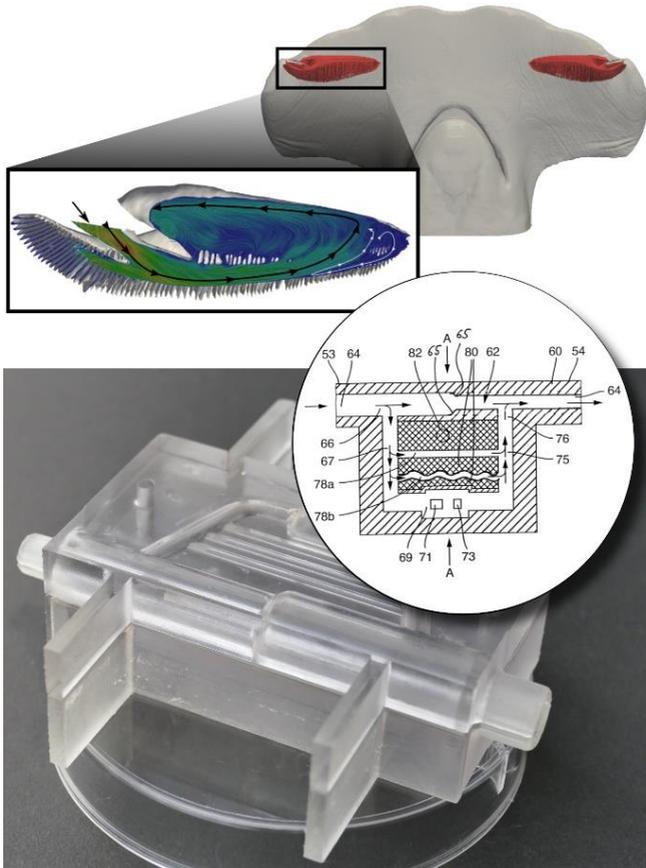
Links oben: Kanne der fleischfressenden Kannenpflanze (*Nepenthes* sp.). Der in benetztem Zustand für Insekten rutschige rote Rand, auch Peristom genannt, ist ca. 1-3 cm breit. Rechts oben: Mit dem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop angefertigte Detailaufnahme der Strukturen des Peristoms. Hierbei handelt es sich um eine Falschfarbendarstellung der Höhentopologie. Unten: Höhenprofildarstellungen der ersten, per 3D-Drucker aus ABS gefertigten Prototypen, welche eine der Hierarchieebenen des *Nepenthes*-Peristoms imitieren.

Haushaltsgeräte (EGO)

Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler und dergleichen – also sogenannte „Weiße Ware“ – sind ein wesentlicher Faktor in der anthropogenen globalen Energiebilanz, weshalb eine effiziente Steuerung ihres Energie- und Ressourcenverbrauchs in Zukunft von großer Bedeutung sein wird. Die Bedingungen, unter denen diese Haushaltsgeräte ihren Dienst verrichten müssen, sind variabel und ändern sich z.B. je nach Verschmutzungsgrad von Geschirr oder Wäsche und damit auch mit dem sich im Gerätekreislauf befindlichen Wasser. Heutige Geräte haben fest einprogrammierte Wasch- oder Spülprogramme, die vom Benutzer ausgewählt werden müssen. Um den optimalen Wirkungsgrad der Waschlauge garantieren zu können, soll diese in Zukunft permanent überwacht werden, mit dem Ziel das Wasch- bzw. Spülprogramm im laufenden Betrieb dynamisch anpassen zu können. Die Herausforderung dabei ist es, eine Analyse zu gewährleisten, die es erlaubt anhand von kleinsten Proben zuverlässig Rückschlüsse auf das gesamte Wasser- bzw. Laugenvolumen im Kreislauf zu ziehen.

Um dies zu erreichen, hat die Plant Biomechanics Group in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner E.G.O. Elektro-Gerätebau GmbH ein Modul für Waschmaschinenschubladen entwickelt, welches optimale Strömungsbedingungen zur Platzierung verschiedenster Sensoren (z.B. zur Messung von Druck, Temperatur, pH, Leitfähigkeit, Oberflächenspannung oder der Qualität und Menge von Fasern und Partikeln) bietet. Vorbild war das Geruchsorgan des Hammerhais (*Sphyrna tudes*), welches es diesem Tier erlaubt selbst kleinste Mengen an Duftstoffen zu erkennen und genau zu verfolgen. Anhand von Morphologiedaten, die aus der Fachliteratur bekannt waren, und mittels Additiver Fertigungsverfahren, Hochgeschwindigkeitsvideografie und 2D-Partikel-Tracking wurden mehrere Demonstratoren von Strömungskanalmodulen gefertigt und optimiert. Dabei wird die Strömungsdynamik der Module im Wesentlichen durch eine optimierte Kanalgeometrie und die Einströmgeschwindigkeit des Fluids, d.h. im Fall einer Waschmaschine der Waschlauge bestimmt.¹³⁾ Die Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg wurde zusammen mit ihrem langjährigen Industriepartnern E.G.O.

Elektro-Gerätebau GmbH für das „Einschubkasten-Modul zur Sensoraufnahme für Waschmaschinen“ mit dem Materialica Gold Award 2019 in der Kategorie „Surface and Technology“ ausgezeichnet.



Oben: Schematische Darstellung des typischen, stark verbreiterten Kopfes vom Hammerhai (*Sphyrna tudes*) mit dem typischen, dessen weit auseinander liegenden Nasenlöcher ihm "zwei-dimensionales" riechen ermöglichen. Das kleine Bild zeigt eine Strömungssimulation innerhalb eines der beiden Riechorgane (Abbildungen verändert aus 12). Mitte: Patentzeichnung des bionischen Moduls für Waschmaschinenschubladen. Unten: 3D-gedrucktes, bionisches Modul für Waschmaschinenschubladen.

Literatur zum Weiterlesen:

(1) T. Speck, O. Speck, C. Neinhuis & H. Bargel (2012): Bionik - Faszinierende Lösungen der Natur für die Technik der Zukunft, 148 pp. – Lavori-Verlag, Freiburg. (ISBN 978-3-935737-21-0)

(2) T. Speck & O. Speck (2015): Von der Klette zum Klettverschluss - Bionik oder wie wir von der Natur die Technik der Zukunft abschauen. – Naturwissenschaftliche Rundschau, 68/10: 22/510 – 35/523

(3) T. Masselter, M. Milwich, H. Monnerat, U. Scharf, M. Hartel & T. Speck (2008): Bio-inspired solutions for technical problems: biomimetic cable entries and shock-absorbing pallets. – In: Brebbia, C.A. (ed.), Design and Nature IV, 51 – 58. WIT Press, Southampton.

(4) M. Milwich, H. Planck, T. Speck & O. Speck (2007): Der technische Pflanzenhalm: ein bionisches Schmaltextil. – Melliand Textilberichte – Band- und Flechtindustrie, 44/2: 34 – 38.

(5) H.F. Bohn, F. Günther, S. Fink & T. Speck (2015): A passionate free climber: Structural development and functional morphology of the adhesive tendrils in *Passiflora discophora*. – International Journal of Plant Sciences, 176: 294 – 305.

(6) <https://www.growbot.eu/>

Finanziert von der Europäischen Kommission im Rahmen von FET Pro-active: emerging paradigms and communities (Research and Innovation Action Grant agreement no. 824074).

(7) M. Thielen, C.N.Z. Schmitt, S. Eckert, T. Speck & R. Seidel (2013): Structure-function relationship of the foam-like pomelo peel (*Citrus maxima*) - an inspiration for the development of biomimetic damping materials with high energy dissipation. – Bioinspiration and Biomimetics, 8: 025001

(8) O. Speck & T. Speck (2019): An overview on bioinspired and biomimetic self-repairing materials. – Biomimetics, 4(1): 26.

- (9) J. Lienhard, S. Schleicher, S. Poppinga, T. Masselter, M. Milwich, T. Speck & J. Knippers (2011): Flectofin: a nature based hinge-less flapping mechanism. – *Bioinspiration and Biomimetics*, 6: 045001
- (10) J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.) (2019): *Bionisch Bauen: Von der Natur Lernen*, 208 pp. – Birkhäuser Verlag, Basel.
- (11) H. F. Bohn & W. Federle (2004): Insect aquaplaning: *Nepenthes* pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(39): 14138–14143
- (12) A. D. Rygg, J. P. L. Cox, R. Abel, A. G. Webb, N. Smith & B. A. Craven (2013): A Computational Study of the Hydrodynamics in the Nasal Region of a Hammerhead Shark (*Sphyrna tudes*): Implications for Olfaction. – *PLoS ONE* 8(3): e59783
- (13) T. Kampowski, M. Langer, G. Bold, T. Masselter, T. Speck & M. Thielen (2020): Rinse, Sense, Adjust, Repeat: Biomimetic continuous process water analysis in washing machines based on the hammerhead shark's olfaction hydrodynamics. – *Advanced Intelligent Systems*, 2(1): 1900152.

Herausgegeben vom Botanischen Garten der Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg i. Br.

Direktor: Prof. Dr. Thomas Speck

Text: Marc Thielen & Thomas Speck

Layout & Herstellung: Diana Hulea

Titelbild: Demonstrator der bionischen, von der Wasserfalle inspirierten
Fassadenverschattung Flectofold in einer Ausstellung im Staatlichen Mu-
seum für Naturkunde Stuttgart.