



Natur als Innovationsmotor für eine nachhaltigere Architektur im 21^{ten} Jahrhundert



Thomas Speck

Botany: Functional Morphology & Biomimetics
 Botanic Garden of the University of Freiburg
 Cluster of Excellence *livMatS* @ FIT

Freiburg Materials Research Centre (FMF) and Freiburg Institute for Interactive Materials & Bioinspired Technologies (FIT)

Networks of Competence Biomimetics-BW & BIONIKON

Biological model: Bird-of-Paradise flower

Trap of waterhail plant

20x deceleration

Kinematic simulation

Bioinspired kinematic facades

Bot Garden Freiburg

© Plant Biomech, Group Freiburg, ITKE & ICD Univ. Stuttgart, livMatS & IntCDC



Weshalb kann/sollte/muss die Natur als Innovationsmotor für eine nachhaltigere Architektur im 21^{ten} Jahrhundert dienen?



© ITKE & ICD Universität Stuttgart & IntCDC

Herausforderung - Das Bauwesen verursacht:
 40% des Ressourcenverbrauchs
 40% des Energieverbrauchs
 50% der Abfallerzeugung

Dies belegt die Bedeutung einer nachhaltigen Architektur im 21. Jahrhundert!



Natur als Innovationsmotor für eine nachhaltigere Architektur im 21^{ten} Jahrhundert



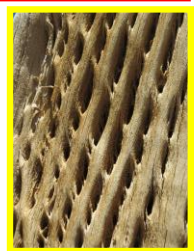
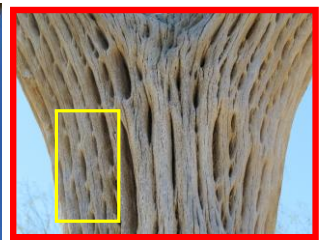
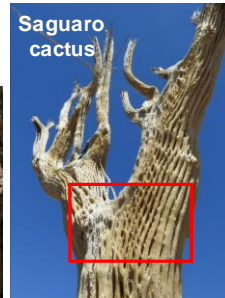
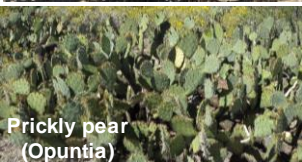
Biologische Modelle des biomimetischen, faser-basierten livMatS-Pavillons im Botanischen Garten Freiburg



Biologische Modelle: Baum- (z.B. Saguaro-Kaktus) und strauchförmige Kakteen (z.B. Opuntien und Cyliandropuntien)...

... und ihre ultra-leichte Holzstruktur

© Plant Biomechanics Group Univ. Freiburg



Biologische Modelle des biomimetischen, faser-basierten livMatS-Pavillons im Botanischen Garten Freiburg

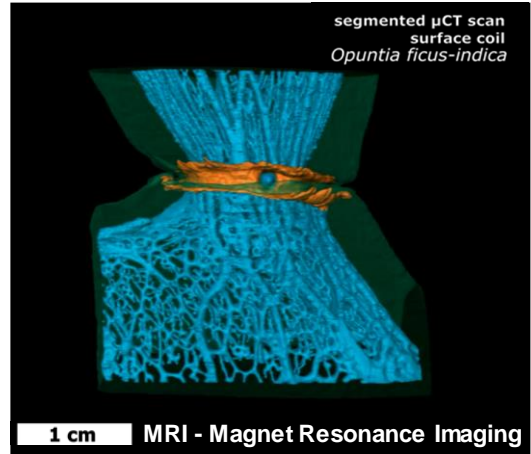
μ-CT – Micro-Computertomographie

© Plant Biomechanics Group Univ. Freiburg & ILK TU Dresden



Strukturelle und mechanische Analyse biologischer Modelle

© Plant Biomechanics Group Univ. Freiburg



M.D. Mylo, L. Hesse, T. Masselter, J. Leupold, K. Drozella, T. Speck & O. Speck (2021): Morphology and anatomy of branch-branch junctions in *Opuntia ficus-indica* and *Cylindropuntia bigelovii*. A comparative study supported by mechanical tissue quantification. *Plants*, 10(11): 2313.
H. Schwager, T. Masselter, T. Speck & C. Neinhuis (2013): Functional morphology and biomechanics of branch-stem junctions in columnar cacti. *Proceedings of the Royal Society London B*, 280: 0132244.

Biologische Modelle des biomimetischen, faser-basierten livMatS-Pavillons im Botanischen Garten Freiburg

Abstraktion von biologischen Modellen und Übertragung in bioinspierte technische Materialsysteme für die Architektur



Abstraktion biologischer Modelle und Umsetzung in technisch machbare Produktionsweisen:



Kernloses Wickeln statt Verwachsen zur Herstellung von vernetzten Leichtbausystemen für die Architektur

Biologische Modelle: Netzartige Strukturen in leichten Holzkörpern von Kakteen werden durch das Verwachsen von Holzsträngen gebildet



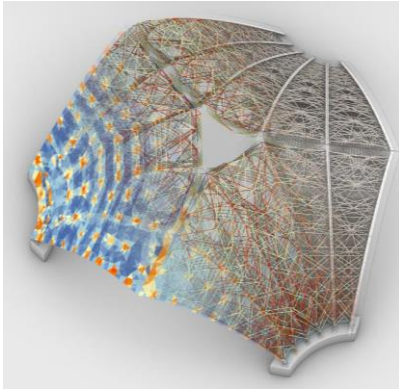
Verwendung von Flachsfasersträngen und Sisalschnüren in bioinspirierten Struktursystemen: Erneuerbare, leicht recycelbare Rohstoffe

➡ bessere Ökobilanz

© Plant Biomechanics Group Univ. Freiburg

© Plant Biomechanics Group Freiburg und ITKE & ICD Univ. Stuttgart

Biologische Modelle des biomimetischen, faser-basierten *livMatS*-Pavillons im Botanischen Garten Freiburg



**Ressourceneffizienter Leichtbau durch digitale Planung und Fertigung
mittels Wicklung (Kernloses Wickeln)**

"Mehr Form - weniger Material"

**Digitale Fertigung:
Kernlose Wicklung mit
Flachfasersträngen
und Sisalkordeln**





www.botanischer-garten.uni-freiburg.de/dateien/pdf/livmats-pavillon



Der biomimetische faserbasierte livMatS-Pavillons im Botanischen Garten Freiburg



Exzellenzcluster livMatS: Living Material Systems

Prof. Thomas Speck, Prof. Jürgen Rühle, Universität Freiburg

Exzellenzcluster IntCDC: Integrative Computational Design and Construction for Architecture

ITECH M.Sc. Programm: Prof. Achim Menges, Prof. Jan Knippers, Universität Stuttgart

www.botanischer-garten.uni-freiburg.de/dateien/pdf/livmats-pavillon



Nutzung des biomimetischen *livMatS*-Pavillons im Botanischen Garten Freiburg in Rahmen von „Learning from Nature in Nature“



Bionik-Tag
Grundschule
Gudelfingen (4. Klasse)

Exzellenzcluster livMatS: Living Material Systems
Prof. Thomas Speck, Prof. Jürgen Rühle, Universität Freiburg

Exzellenzcluster IntCDC: Integrative Computational Design and Construction for Architecture
ITECH M.Sc. Programm: Prof. Achim Menges, Prof. Jan Knippers, Universität Stuttgart

www.botanischer-garten.uni-freiburg.de/dateien/pdf/livmats-pavillon

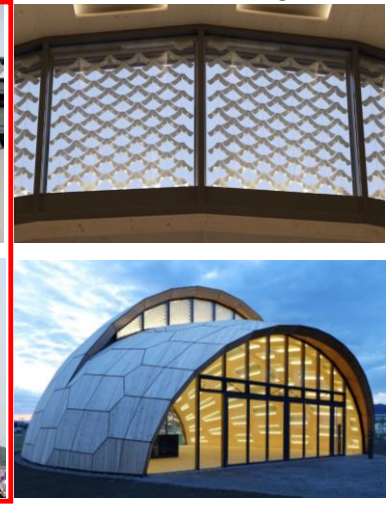


Natur als Innovationsmotor für eine nachhaltigere Architektur im 21^{ten} Jahrhundert



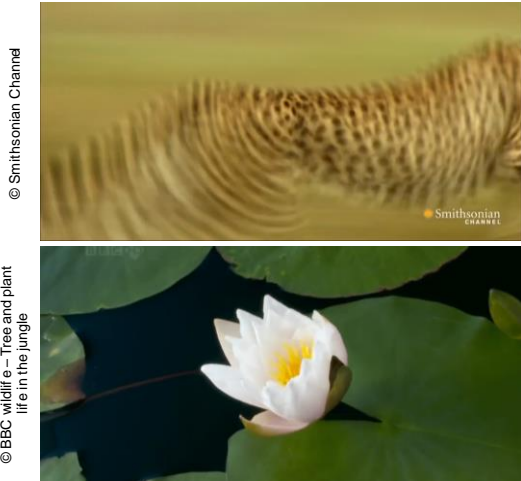
Kaktusinspirierter *livMatS*-Faserpavillon

Bioinspirierte Gebäudehüllen und Fassadenverschüttungen



© Botanischer Garten & livMatS Freiburg und ITKE & ICD Univ. Stuttgart

Bewegung und Fortbewegung im Tier- und Pflanzenreich: ein charakteristischer Aspekt des Lebens



T. Speck, S. Poppinga, O. Speck & F. Tauber (2021): Bio-inspired life-like motile materials systems: Changing the boundaries between living and technical systems in the Anthropocene? The Anthropocene Review, 20530196211039275.

Bewegung und Fortbewegung im Tier- und Pflanzenreich sind durch eine tiefe Integration der antreibenden Teile in den bewegten/bewegenden Körper und eine eingebettete Elastizität der Bewegung gekennzeichnet. Sichtbare Positions- oder Lageänderungen bei sich bewegenden Tieren finden in der Regel in einer Zeitskala von Zehntelsekunden bis zu mehreren Sekunden statt, so dass sie für unser optisches System erkennbar sind.



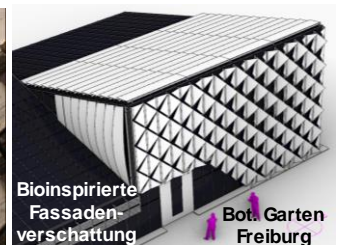
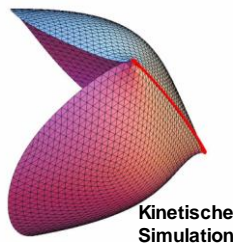
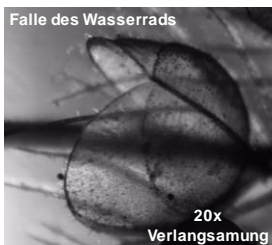
Bio-inspirierte Fassadenbeschattungssysteme: Flectofin®, Flectofold und FlectoLine



Flectofin® - Biologisches Modell: Sitzstange der Paradiesvogelblume



Flectofold - Biologisches Modell: Falle der fleischfressenden Wasserfalle



J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.) (2019): Biomimetics for Architecture: Learning from Nature, 208 pp. Birkhäuser Verlag, Basel. (ISBN 978-3-0356-1785-6)

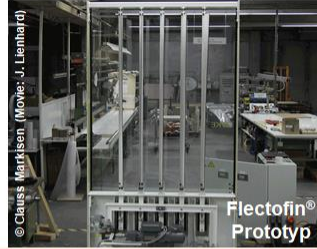


Bio-inspirierte Fassadenbeschattungssysteme: Flectofin®, Flectofold und FlectoLine



© Plant Biomechanics Group Freiburg & ITKE Univ. Stuttgart

Flectofin® - Biologisches Modell: Sitzstange der Paradiesvogelblume



Biologisches Modell Paradiesvogelblume

BIONA

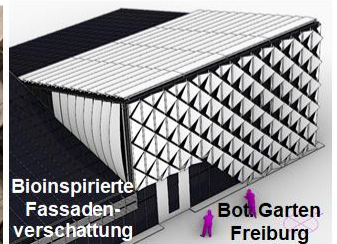
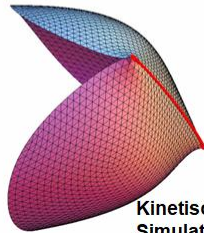
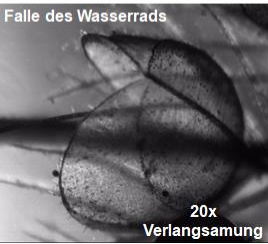
© Carsten Marthinsen (Movie: J. Lienhard)

Flectofin® Prototyp

Soma Architecture & Knippers Helbig Engineers

Bioinspirierte Kinetische Fassade: Pavillon Expo 2012 (Yeosu, South Korea)

Flectofold - Biologisches Modell: Falle der fleischfressenden Wasserfalle



Falle des Wasserrads

20x Verlangsamung

Kinetische Simulation

Flectofold Prototyp

Final Assembly: Jet-Inch Pneumatic Actuation System

Bioinspirierte Fassadenverschattung

Bot. Garten Freiburg

J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.) (2019): Biomimetics for Architecture: Learning from Nature, 208 pp. Birkhäuser Verlag, Basel. (ISBN 978-3-0356-1785-6)



Paradiesvogelblume (*Strelitzia reginae*) Blüten von Vögeln bestäubt



Sonnenvogel

© www.birdinfo.co.za



Baya - Webervogel

© Rouslou Korts



© Plant Biomechanics Group Freiburg

S. Poppinga, T. Masselner, J. Lienhard, S. Schleicher, J. Knippers & T. Speck (2010). In: Erlebitt, C.A. & Camp, A. (eds.), Design and Nature V, 403–410. WIT Press, Southampton.

Kooperationsprojekt PBG Uni. Freiburg, ITKE Univ. Stuttgart & ITV Denkendorf

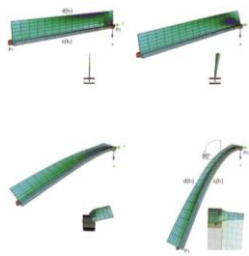


Von der Paradiesvogelblume zum Flectofin® Fassadenverschattungssystem



universität freiburg

© ITKE Stuttgart & Plant Biomechanics Group Freiburg



Abstraktionslevel: Simulation (FEM)



Funktionsmodell Flectofin® Fassadenverschattungssystem

Prototyp Flectofin® Fassadenverschattungssystem®: Biegung durch hydraulische Stempel an der Basis der einzelnen Lamellen

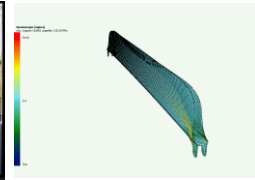


Claudia Marklisen (Motive: J. Lienhard)

Weitere Entwicklungen basierend auf dem Flectofin®



© B. Miklautsch



Doppel-Flectofin

© ITKE Stuttgart & Plant Biomechanics Group Freiburg

Soma Architecture (Wien) und Knippers Helbig Engineers (Stuttgart)



Bio-inspired kinematische Fassade: Thematischer Pavillon / Expo 2012 (Yeosu, South Korea)

J. Lienhard, S. Schleicher, S. Poppinga, T. Masseller, M. Milwich, T. Speck & J. Knippers (2011): Flectofin: a nature based hinge-less flapping mechanism. *Bioinspiration and Biomimetics*, 6: 045001.



Bio-inspirierte Fassadenbeschattungssysteme: Flectofin®, Flectofold und FlectoLine



universität freiburg

Flectofin® - Biologisches Modell: Sitzstange der Paradiesvogelblume

© Plant Biomechanics Group Freiburg & ITKE Univ. Stuttgart



Biologisches Modell Paradiesvogelblume



© Claudia Marklisen (Motive: J. Lienhard)

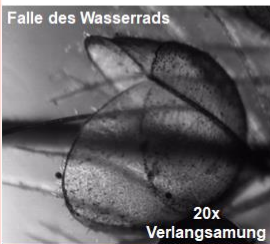
Flectofin® Prototyp



Soma Architecture & Knippers Helbig Engineers

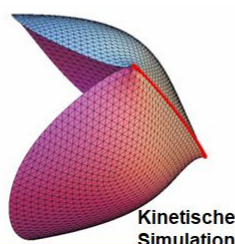
Bioinspirierte kinetische Fassade: Pavillon Expo 2012 (Yeosu, South Korea)

Flectofold - Biologisches Modell: Falle der fleischfressenden Wasserfalle



Falle des Wasserrads

20x Verlangsamung



Kinetische Simulation



Flectofold Prototyp

Final Assembly (with Pneumatic Actuation System)



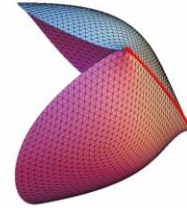
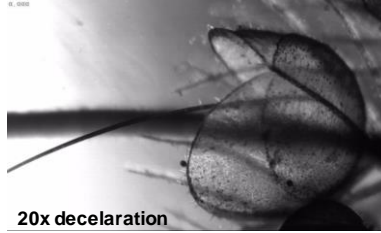
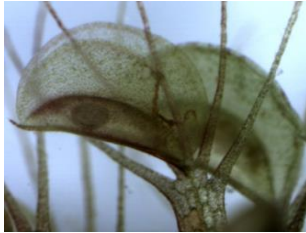
Bioinspirierte Fassadenverschattung

Bot. Garten Freiburg

J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.) (2019): *Biomimetics for Architecture: Learning from Nature*, 208 pp. Birkhäuser Verlag, Basel. (ISBN 978-3-0356-1785-6)

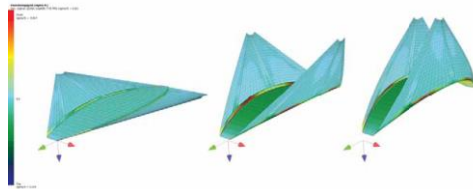
Das Karnivore Wasserrad als Ideengeber für eine biomimetische Fassadenverschattung

© Plant Biomechanics Group Freiburg

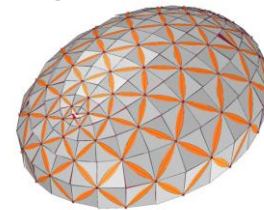


© ITKE Stuttgart

Die zwei Blatthälften der Schnappfalle des Wasserrads (*Aldrovanda vesiculosa*) bleiben unverformt. Das Schließen der Schnappfalle wird durch hydraulische Deformation (Biegung) der die beiden Blatthälften verbindenden Mittelrippe aktuiert und stellt eine Bewegungsverstärkung (motion amplification).



Kinetische Model der Schnappfalle der Wasserrads im FE-Modell (Aktuierung über gekrümmte Falten)



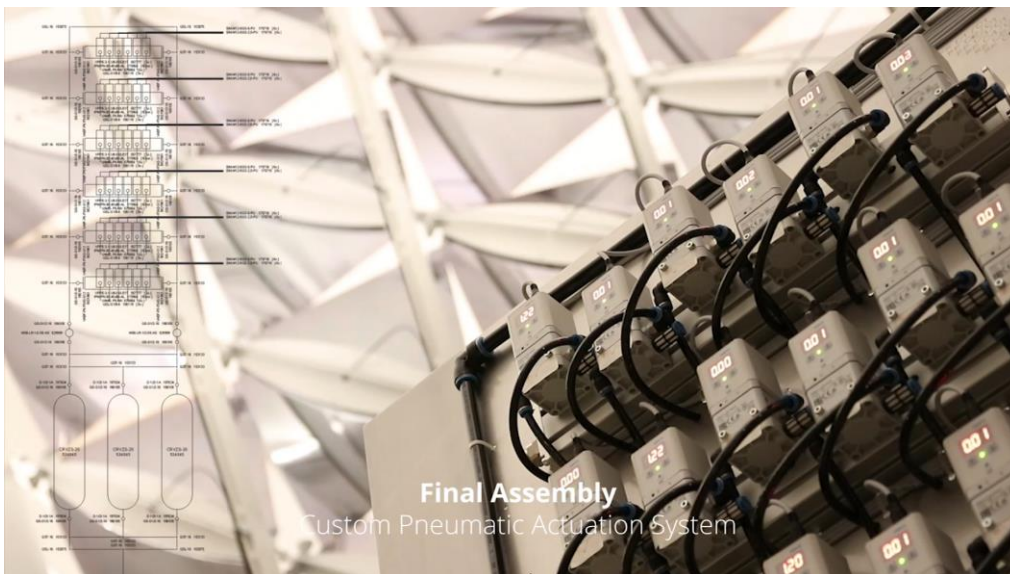
© ITKE Stuttgart

Flexible Flectofold-Verschattungselemente auf einer doppelt gekrümmten Oberfläche

Elastische Architektur - Bio-inspiriertes Fassadenbeschattungssystem: Flectofold

Flectofold Demonstrator mit 36 individuell pneumatisch aktuierten Modulen

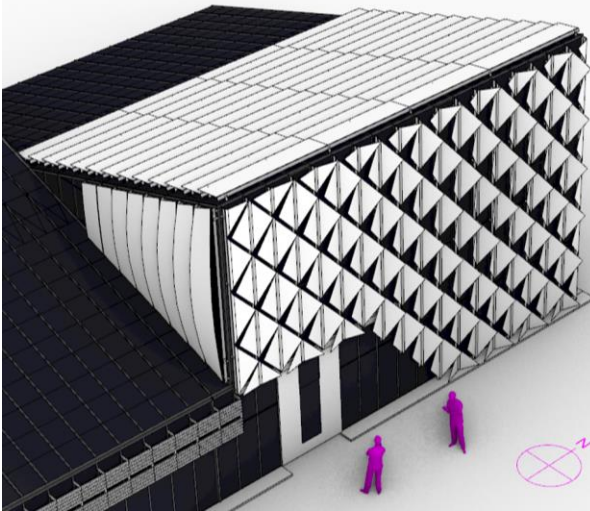
© ITKE & ITFT University of Stuttgart and ITV Denkendorf & Plant Biomechanics Group Freiburg



J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.) (2019): *Biomimetics for Architecture: Learning from Nature*, 208 pp. Birkhäuser Verlag, Basel. (ISBN 978-3-0356-1785-6)

A. Köner, L. Born, A. Mader, R. Sachse, S. Saffarian, A. S. Westemeier, S. Poppinga, M. Birschoff, G. T. Gresser, M. Milwich, T. Speck & J. Knippers (2018): Flectofold – A biomimetic compliant shading device for complex free form facades. *Smart Materials and Structures*, 27 (1): 017001.

Elastische Architektur - Bio-inspiriertes Fassadenbeschattungssystem: Flectofold



Zu verschattende Flächen:

Dachfläche:	130 m ²
Südfassade:	20 m ²
Ostfassade:	150 m ²

Verschattungsvarianten:

Gesamt:	Stahlunterkonstruktion
Dachfläche:	Feststehende Lamellen
Südfassade:	Elastische GFRP Lamellen
Ostfassade:	GFRP Faltelemente mit integrierter Aktuatorik

J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.) (2019): *Biomimetics for Architecture: Learning from Nature*, 208 pp. Birkhäuser Verlag, Basel. (ISBN 978-3-0366-1785-6)

A. Körner, L. Born, A. Mader, R. Sachse, S. Saffarian, A. S. Westermeyer, S. Poppinga, M. Bischoff, G. T. Gresser, M. Milwich, T. Speck & J. Knippers (2018): *Flectofold – A biomimetic compliant shading device for complex free form facades*. *Smart Materials and Structures*, 27(1): 017001.

Demonstrator Modell für eine reale Umsetzung am Gärtnerstützpunkt des Bot. Gartens Freiburg

SFB-TRR 141 & BioElast Cooperation project PBG Freiburg, ITKE & IBB Stuttgart, ITV Denkendorf

Elastische Architektur - Bio-inspiriertes Fassadenbeschattungssystem: FlectoLine



J. Knippers, U. Schmid & T. Speck (eds.) (2019): *Biomimetics for Architecture: Learning from Nature*, 208 pp. Birkhäuser Verlag, Basel. (ISBN 978-3-0366-1785-6)

A. Körner, L. Born, A. Mader, R. Sachse, S. Saffarian, A. S. Westermeyer, S. Poppinga, M. Bischoff, G. T. Gresser, M. Milwich, T. Speck & J. Knippers (2018): *FlectoLine – A biomimetic compliant shading device for complex free form facades*. *Smart Materials and Structures*, 27(1): 017001.



Natur als Innovationsmotor für eine nachhaltigere Architektur im 21^{ten} Jahrhundert



Kaktusinspirierter livMatS-Faserpavillon



© Botanischer Garten & livMatS Freiburg und ITKE & ICD Univ. Stuttgart

Bioinspirierte Gebäudehüllen und Fassadenverschttungen



livMatS Biomimetic Shell @ FIT



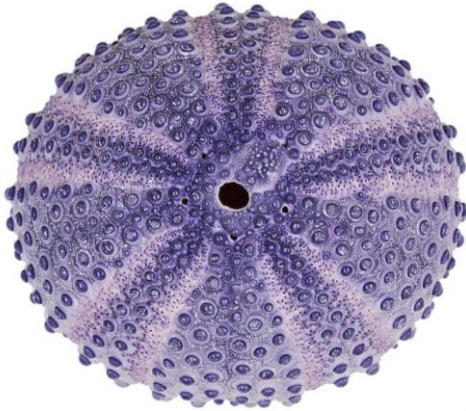
Die innovative Holzkonstruktion überspannt eine Grundfläche von 200 m² und besteht aus 127 verschiedenen Hohlkassetten.



© Clusters of Excellence IntCDC University Stuttgart & livMatS University Freiburg

livMatS Biomimetic Shell @ FIT

Seeigelskelette als Ideengeber für die Gebäudehülle



Colobocentrotus atratus
© Wikimedia Commons

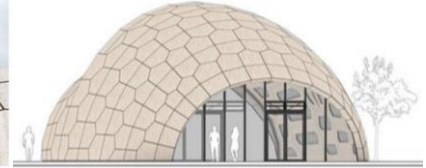


Foto: Conné van d'Oonck / ICD/ITXE/IntCDC University of Stuttgart



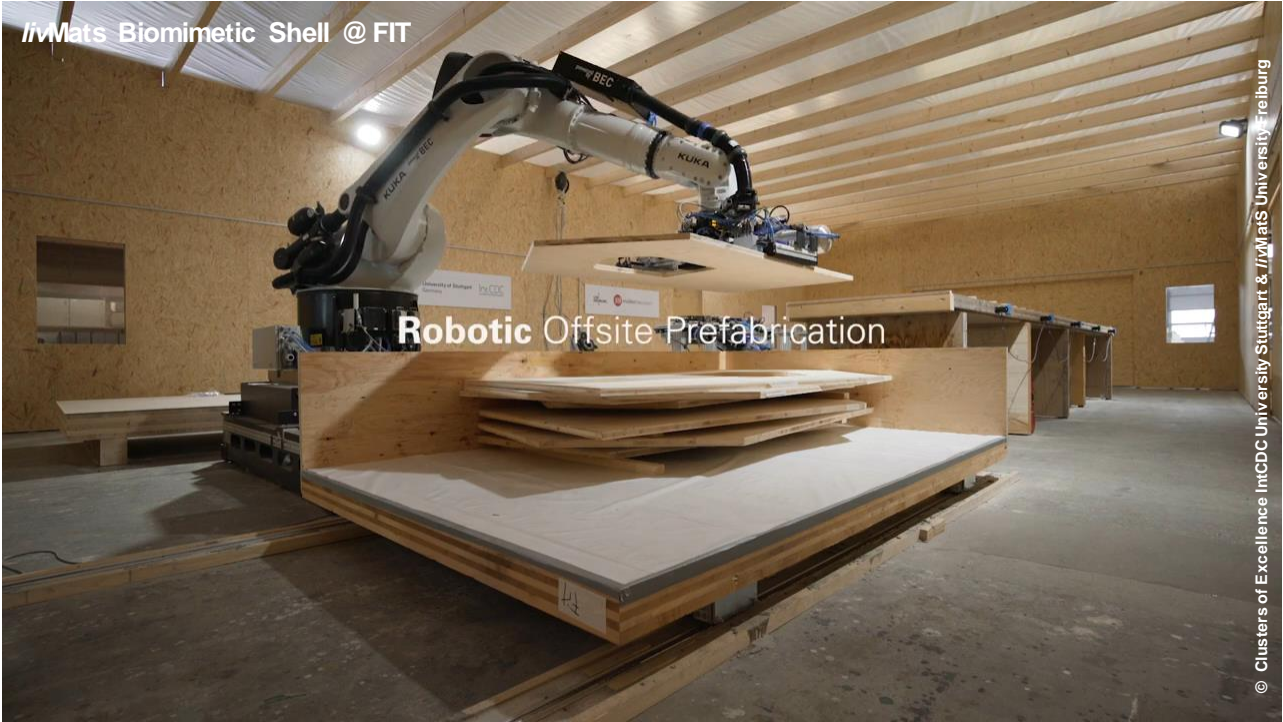
livMats Biomimetic Shell @ FIT



Lebenszyklusanalyse: (1) Materialverbrauch des Gebäudes im Vergleich zu einem konventionellen Holzgebäude um mehr als 50 Prozent und (2) Treibhauspotenzial um fast 63 Prozent reduziert.

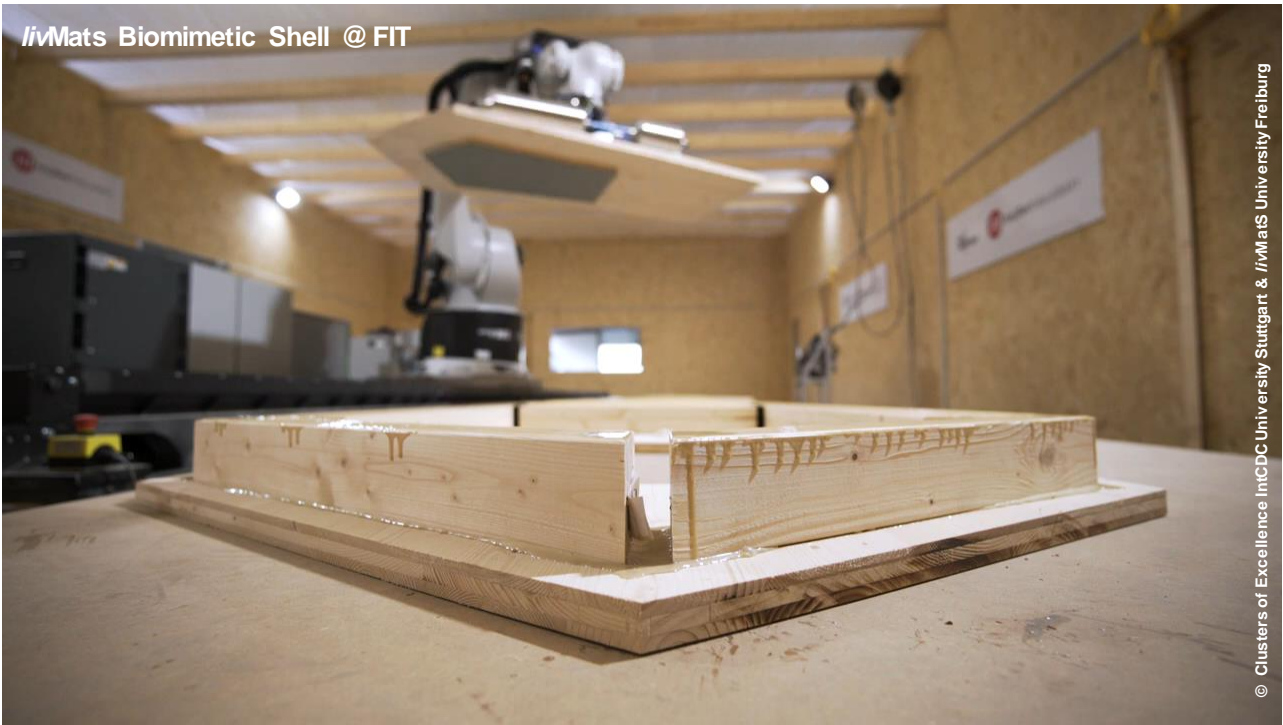
Gute Schall- und Wärmeisolierung durch Filzmatten in den Holzkassettenbauweise mit dreischichtigen Fichtenbrettern.

livMats Biomimetic Shell @ FIT



© Clusters of Excellence IntCDC University Stuttgart & livMats University Freiburg

livMats Biomimetic Shell @ FIT



© Clusters of Excellence IntCDC University Stuttgart & livMats University Freiburg

livMats Biomimetic Shell @ FIT

Cyber-Physical Onsite Assembly

© Clusters of Excellence IntCDC University Stuttgart & livMats University Freiburg

livMats Biomimetic Shell @ FIT

© Clusters of Excellence IntCDC University Stuttgart & livMats University Freiburg

Autonome hygroskopische Bewegungen in Pflanzenorganen und -strukturen

Hygroskopisches Öffnen und Schließen der Samenschuppen eines Kiefernzapfens: Vorbilder für 4D-gedruckte biomimetische hygroskopische Klappenstrukturen

© Plant Biomechanics Group Freiburg

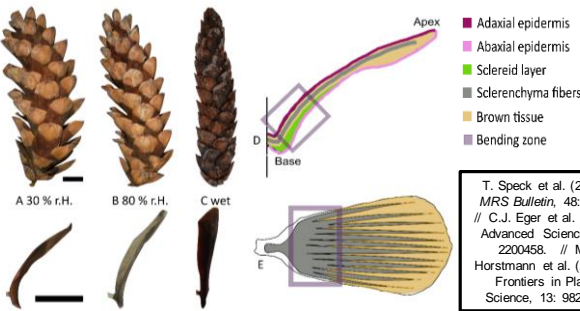


Zeitraffer-Kameraanalysen: Film über mehrere Stunden

C.J. Eger, M. Horstmann, S. Poppinga, R. Sachse, R. Thierer, N. Nestle, B. Bruchmann, T. Speck, M. Bischoff & J. Rühle (2022): The Structural and Mechanical Basis for Passive-Hydraulic Pine Cone Actuation. *Advanced Science*, 202200458. // M. Horstmann, H. Buchheit, T. Speck & S. Poppinga (2022): The cracking of Scots pine (*Pinus sylvestris*) cones. *Frontiers in Plant Science* (under review). // D. Correa, S. Poppinga, M. Mylo, A. Westermeyer, B. Bruchmann, A. Menges & T. Speck (2020): 4D pine scale: biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multiphase movement. *Philosophical Transactions of the Royal Society London A*, 378 (2167): 20190445. // S. Poppinga, D. Correa, B. Bruchmann, A. Menges & T. Speck (2020): Plant movements as concept generators for the development of biomimetic compliant mechanisms. *Integrative and Comparative Biology*, 60(4): 886-895.

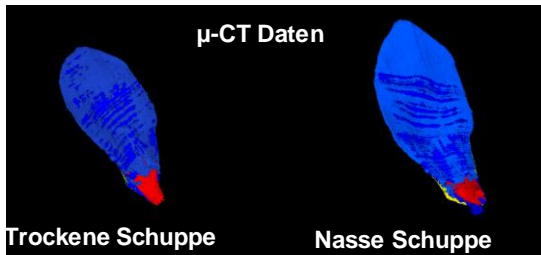
Integrierte (physische) Intelligenz: Hygroskopische autonome Bewegungen in Kiefernzapfen und -schuppen

© Plant Biomechanics Group Uni. Freiburg

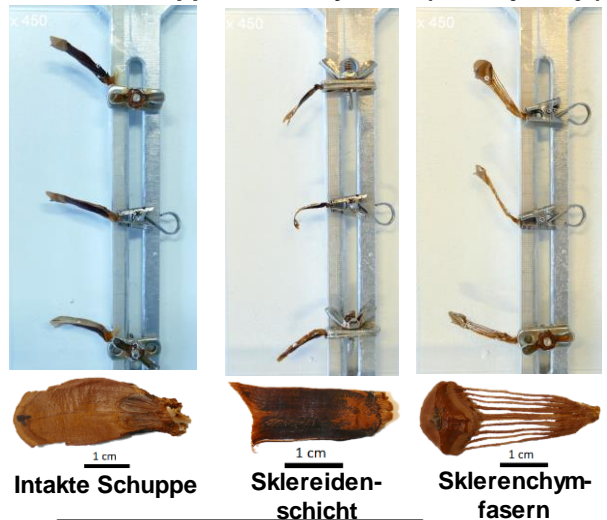


T. Speck et al. (2023) *MRS Bulletin*, 48: 1-16
// C.J. Eger et al. (2022) *Advanced Science*, 9: 2200458. // M. Horstmann et al. (2022). *Frontiers in Plant Science*, 13: 982756.

Struktureller Aufbau: *Pinus wallichiana* Schuppe



Bewegung versch. Schuppengewebe: hierarchisches Doppelschichtsystem (*Pinus jeffreyi*)



K. Ulrich, T. Masselter & T. Speck (2024) unpublished data

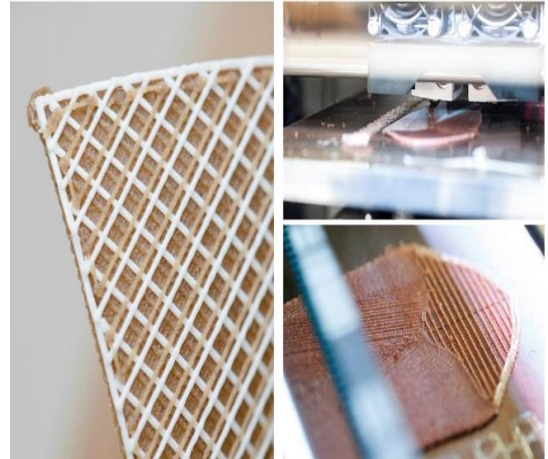
Reaktionsfähige autonome Flächenelemente nach dem Vorbild passiver mehrphasiger Pflanzenbewegungen

Technischer Transfer und Entwicklung von Demonstratoren

Technischer Transfer durch additive Fertigung in Multimaterial-Strukturen mit folgenden Merkmalen:

- mechanisch robust
- funktionsintegriert
- umweltverträglich
- zeigen mehrphasige Bewegungen ohne Verbrauch von externer Energie

Werkstoffe: Co-Polyester mit eingebetteten Zellulosefasern
Akrylnitril-Butadien-Styrol = ABS-Kunststoff



© ICD Uni Stuttgart

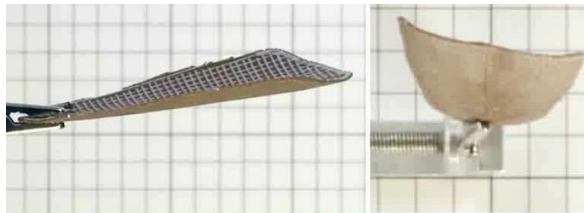
Nahaufnahme der reaktionsfähigen Oberflächenstruktur und des 3D-Druckverfahrens mit der entstandenen Struktur

D. Correa & A. Menges (2017) In: Menges et al. (eds) *Fabricate - Rethinking Design and Construction*, UCL Press, 190-195
D. Correa, S. Poppinga, M. Mylo, A. Westermeier, B. Bruchmann, A. Menges & T. Speck (2020): Biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 378 (2167): 20190445. DOI.org/10.1098/rsta.2019.0445

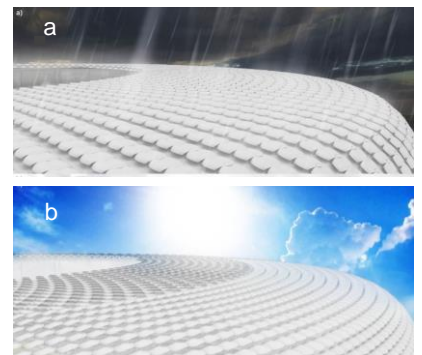
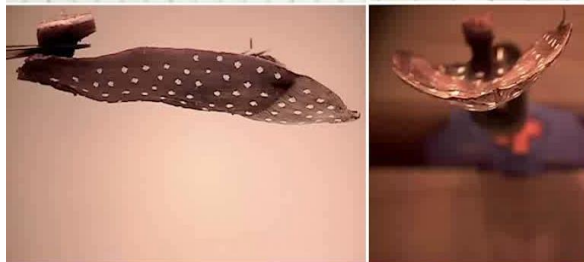
Reaktionsfähige autonome Flächenelemente nach dem Vorbild passiver mehrphasiger Pflanzenbewegungen

Werkstoffe: Co-Polyester mit eingebetteten Zellulosefasern
Akrylnitril-Butadien-Styrol = ABS-Kunststoff

Biomimetische 4D-gedruckte Schuppe



Biologische Kiefernzapfenschuppe



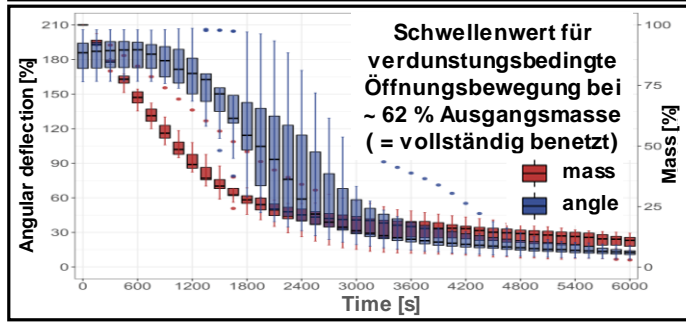
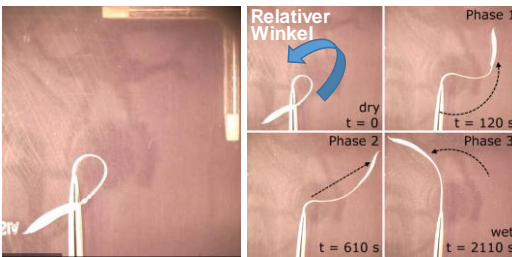
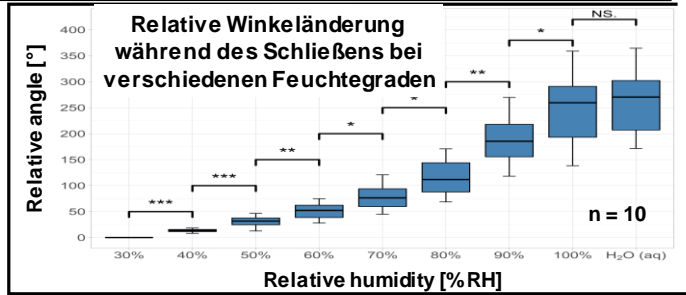
Vision einer intelligenten Gebäudehülle mit biomimetischen Aktoren bei a) Regen und b) direkter Sonne

S. Poppinga, C. Zollfrank, O. Prucker, J. Rühle, A. Menges, T. Cheng & T. Speck (2018): Towards a new generation of smart biomimetic actuators for architecture. *Advanced Materials*. 1703653. DOI: 10.1002/adma.201703653

© PBG Uni Freiburg & ICD Uni Stuttgart

Nachweis des Konzepts: Technische Umsetzung eines biaxialen Zwei-Phasen-Bewegungsmusters

Hygroskopische einachsige Drei-Phasen-Bewegung der Deckblätter von *Carlina acaulis*

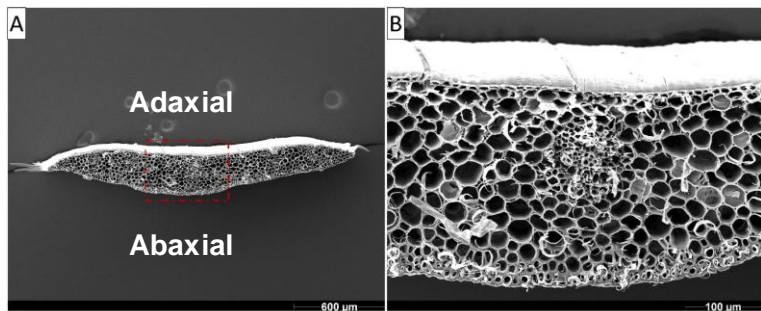


© Plant Biomechanics Group Uni. Freiburg

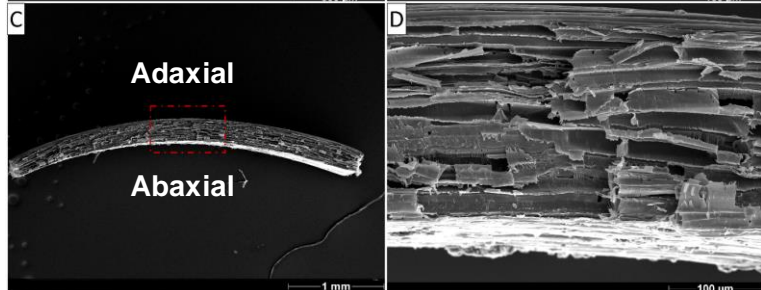
Hygroskopische einachsige Drei-Phasen-Bewegung der Deckblätter von *Carlina acaulis*

Zelluläre Struktur der Deckblätter von *Carlina acaulis*

Querschnitt



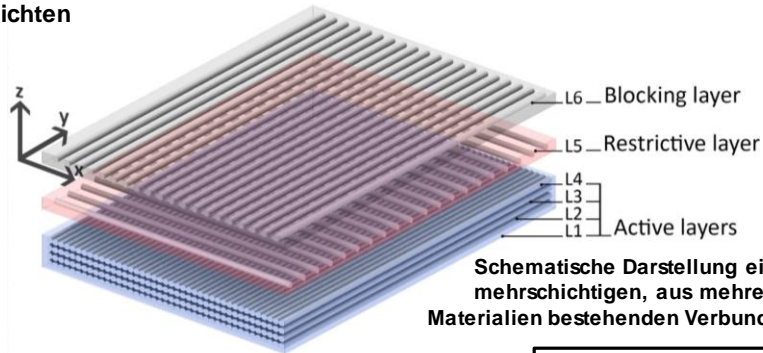
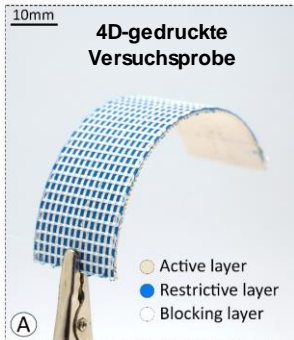
Längsschnitt



© Plant Biomechanics Group Uni. Freiburg

Programmierung der Zeitskala in bioinspir. 4D-gedruckten Materialsystemen:

1. Durch Dickenänderung der aktiven Schicht
2. Durch Variation der Porosität in der Mesostruktur der aktiven Schichten
3. Durch teilweise Blockierung der Oberfläche für die Wasseraufnahme/Desorption durch zusätzliche hydrophobe Funktionsschichten



Y. Tahouni, F. Krüger, S. Poppinga, D. Wood, M. Pfaff, J. Rühle, T. Speck & A. Menges (2021): Programming sequential motion steps in 4D-printed hygro-morphs by architectures mesostructured and differential hygro-responsiveness. *Bioinspiration and Biomimetics*, 16: 055002

Mesostrukturiertes 4D-gedrucktes hygroskopisches Materialsystem, aus funktionellen Multischichten mit Wasserdurchlässigkeitsanisotropie, inspiriert durch Struktur und Funktion der Silberdistel-Deckblätter & Kiefernzapfenschuppen

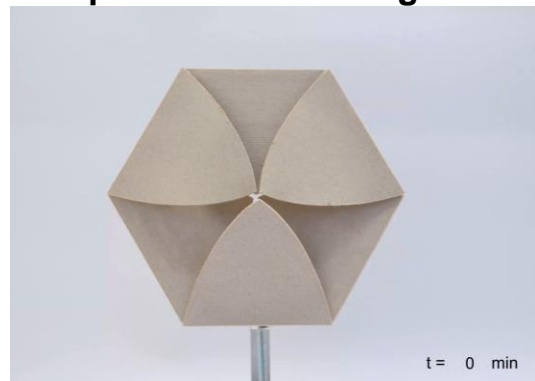
© ICD Uni. Stuttgart & Plant Biomechanics Group Freiburg



Ohne sequentielles Öffnungsmuster

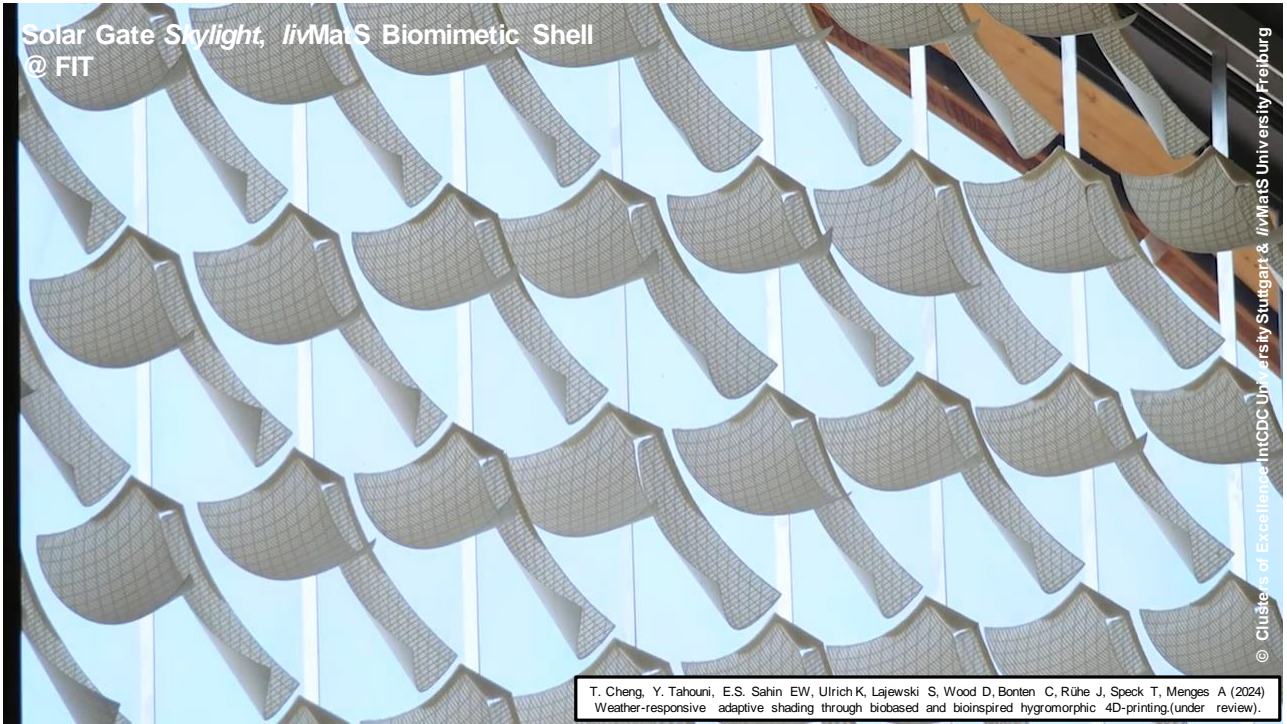
Y. Tahouni, F. Krüger, S. Poppinga, D. Wood, M. Pfaff, J. Rühle, T. Speck & A. Menges (2021): Programming sequential motion steps in 4D-printed hygro-morphs by architectures mesostructured and differential hygro-responsiveness. *Bioinspiration and Biomimetics*, 16: 055002

4D-gedruckte hygroskopische Demonstratoren, bestehend aus funktionellen Mehrschichten mit oder ohne sequenziellem Öffnungsmuster



Mit sequenziellem Öffnungsmuster

© ICD Uni. Stuttgart & Plant Biomechanics Group Freiburg



Der Lebende Pavillon im Botanischen Garten Kooperation mit Prof. Dr. Ferdinand Ludwig TU München



universität freiburg

© Plant Biomechanics Group, Univ. Freiburg



M.D. Mylo, F. Ludwig, M.A. Rahman, Q. Shu, C. Fleckenstein, T. Speck & O. Speck (2023): Conjoining Trees for Future Cities: Investigations on a Long-Term Inoculation Study for Living Architecture. *Plants*. 12: 1385.



5 Group leaders, 3 Postdoc, 11 PhD-students, 10 Bachelor-
Master- & Stex-Students, 5 Technicians, 13 Gardeners

We also acknowledge the successful collaboration with
many industrial partners in biomimetic R&D-projects

Plant Biomechanics Group – Botanic Garden University of Freiburg
www.botanischer-garten.uni-freiburg.de

Cluster of Excellence “Living, Adaptive and Energy-autonomous Materials Systems”: *livMatS* @ FIT
www.livmats.uni-freiburg.de

FIT - Freiburg Center for Interactive Materials and Bioinspired Technologies
www.fit.uni-freiburg.de

Competence Network ,Biomimetics‘ Baden-Württemberg (MWK-BW) & Education/Teaching in Biomimetics
www.kompetenznetz-biomimetik.de
www.bionik-online.de www.bionik-vitrine.de www.bionik-blog.de

Virtual tour through biomimetic meets architecture exhibition: https://www.trr141.de/180409_Bionik/

Danksagung



livMats Biomimetic Shell @ FIT

© Clusters of Excellence IntCDC University Stuttgart & livMats University Freiburg