

Effiziente Fortbewegung durch Reibungsanisotropien - Einfluss von Matrialelastizität, Oberflächengeometrie und Substratrauhigkeit

Halvor T. Tramsen¹, Poramate Manoonpong², Stanislav N. Gorb¹, Lars Heepe¹

1 Funktionelle Morphologie und Biomechanik, Zoologisches Institut, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

2 Embodied AI and Neurorobotics Lab, Centre for BioRobotics, The Mærsk Mc-Kinney Møller Institute, University of Southern Denmark; Bio-inspired Robotics and Neural Engineering Lab, School of Information Science & Technology, Vidyasirimedhi Institute of Science & Technology

Summary

Surfaces with anisotropic properties as observed in the scales of snake skin, shark skin, and attachment systems of insects are most often considered to be defined by their asymmetric topography. However, to deduce the function by the form need not always be true. In frictional systems, a large variety of parameters is relevant for their tribological characteristics.

By using a bio-inspired sawtooth-structured surface, we show that anisotropic friction properties depend not only on the asymmetric surface topography but that they are greatly controlled by a variety of parameters such as material elasticity, aspect ratio of the structures as well as by the substrate roughness. By varying these we were not only able to control the degree of friction anisotropy but, for specific sets of parameters, we could invert friction anisotropy, thereby inverting the structures' preferred direction of motion.

Zusammenfassung

Die Funktionsweise anisotroper Oberflächen, wie sie beispielsweise bei Schlangenschuppen, Haifischhaut und Haftstrukturen von Insekten zu finden sind, scheint meist auf den ersten Blick eindeutig zu sein. Aber Vorsicht: ein zweiter Blick lohnt sich. Von der Form auf die Funktionsweise zu schließen ist nicht immer ausreichend.

Ausgehend von biologischen Oberflächen mit anisotroper Oberflächen-topografie haben wir ein einfaches anisotropes Modellsystem, bestehend aus sägezahnförmigen Oberflächen, abstrahiert und dessen Reibeigenschaften untersucht. Wir konnten zeigen, wie das Ändern relevanter Parameter wie Elastizität, Oberflächengeometrie und Substratraueheit die anisotropen Reibeigenschaften des Systems beeinflusst. Dabei war es uns nicht nur möglich, den Grad der Anisotropie und den Reibbeitrag zu kontrollieren, sondern in bestimmten Kombinationen sogar eine Inversion der Reibanisotropie zu erzeugen. Damit kann je nach Auswahl der Eigenschaften des Systems die bevorzugte Bewegungsrichtung definiert werden.

Einleitung

Viele biologische Oberflächen weisen eine Oberflächenstrukturierung auf. Eine besondere Klasse von Oberflächenstrukturierungen sind Oberflächen mit anisotroper Topografie, die in vielen Bereichen der Natur zu beobachten sind (siehe Abbildung 1). So gibt es speziell geformte Dentikel zur Strömungsreduzierung auf der Haifischhaut [1,2], Schuppung der Schlangenhaut, die selbst wiederum eine anisotrope Mikrostrukturierung zur effizienten Fortbewegung aufweist [3,4] oder anisotrope Anordnung von Hafthaaren bei Reptilien, Spinnen und Insekten [5,6,7]. Viele bio-inspirierte Konzepte haben diese Anisotropie aufgegriffen und haifisch- [8] und schlangenhautartige [3,4] Oberflächen sowie eine Vielzahl von gecko-inspirierten Haftstrukturen [9,10] entwickelt und in diversen Robotikanwendungen eingesetzt [9-11,1].

Dabei wird die Reibungsanisotropie einer Oberfläche häufig als eine von der asymmetrischen Topographie einer Oberfläche hervorgerufene Eigenschaft angesehen [12-15]. Die Kontrolle der Reibeigenschaften einer solchen anisotropen Oberfläche erfolgt häufig ausschließlich über die Kontrolle dieser Topographie [12,15].

Allerdings weisen biologische Oberflächen eine Vielzahl von Materialsteifigkeiten, Größen und Formen auf und sind in stark unterschiedlichen Lebensräumen unter und über Wasser, auf glattem Stein, in Sand etc zu finden. Bio-inspirierte Oberflächen und Anwendungen dagegen sind meist für optimale Eigenschaften in einem spezifischen Szenario (meist eine weiche Struktur auf einem harten glatten Substrat) entwickelt.

In dieser Arbeit untersuchen wir die Reibeigenschaften eines anisotropen Modellsystems in einer Vielzahl von möglichen Konfigurationen, indem wir

sowohl die Materialsteifigkeit der Strukturen als auch die der Substrate, das Aspektverhältnis der Strukturen sowie die Substratrauhigkeit systematisch ändern.

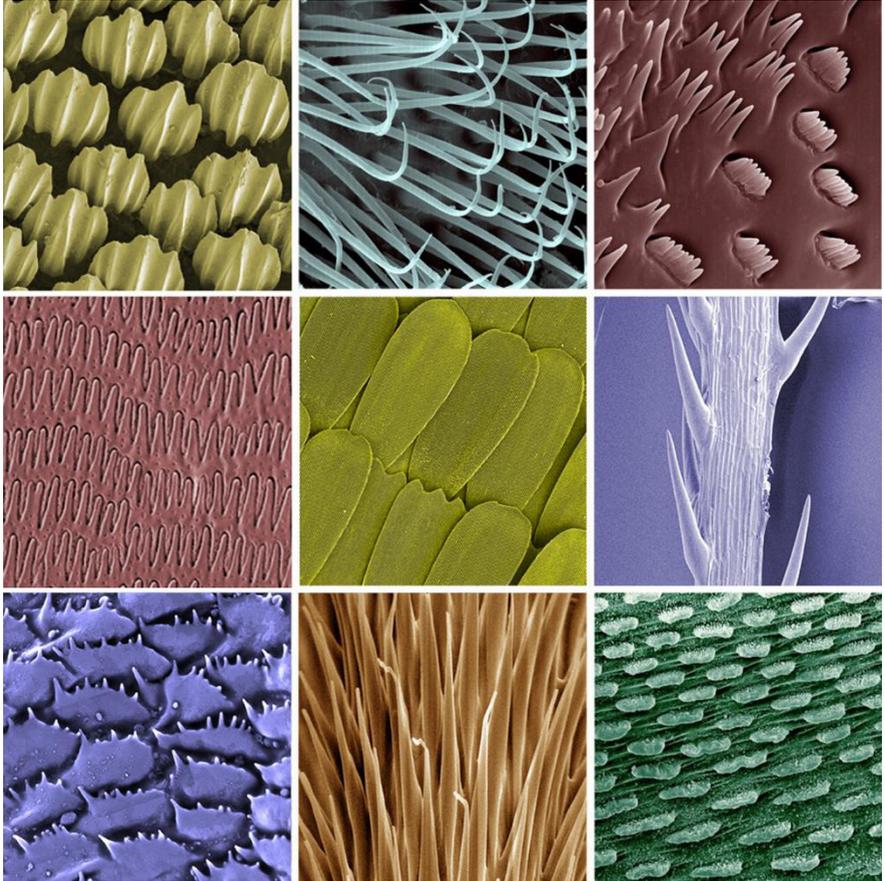


Abb. 1: Nachkolorierte elektronenmikroskopische Aufnahmen von verschiedenen anisotropen biologischen Oberflächen. ©Gorb, Heepe, Tramsen.

Methoden

Unser anisotropes Modellsystem besteht aus Stegen mit sägezahnförmigem Querschnitt (siehe Abbildung 2). Die drei Sägezahnprofile mit unterschiedlichen Aspektverhältnissen (niedrig, mittel, hoch) wurden

jeweils aus zwei unterschiedlichen Materialien hergestellt: zum einen aus einem weichen Silikonmaterial (PDMS, Sylgard 184 (Dow Corning Corp., Midland, MI, USA), $E \sim 2\text{MPa}$), zum anderen aus einem steifen Epoxidharz (Araldite AW 106 Harz und HV953 Härter (Vantico Pty. Ltd, Hongkong, China), $E \sim 5\text{GPa}$). Die Substrate für die Reibexperimente wurden aus den gleichen o. g. Materialien hergestellt, indem Sandpapier mit drei unterschiedlichen Körnungen (durchschnittliche Partikelgröße $52\mu\text{m}$, $82\mu\text{m}$ und $201\mu\text{m}$, Al_2O_3 Partikel (Diamond Brand, Shanghai, China)) sowie eine glatte Glasoberfläche abgegrissen wurden.

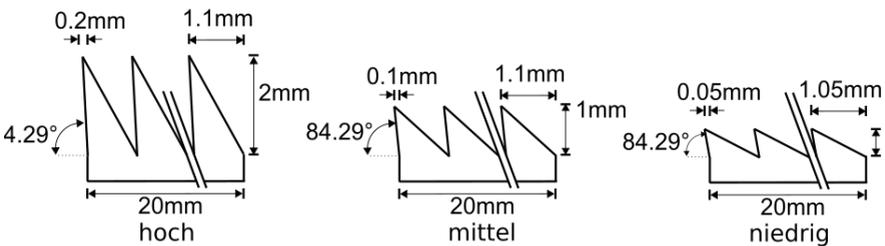


Abb. 2: Schematische Darstellung der drei unterschiedlichen Aspektverhältnisse der anisotropen Strukturen nach [23]

Die Reibmessungen wurden an einem Tribometer (DS4-Peeling Tester (TETRA GmbH, Ilmenau, Deutschland)) durchgeführt, indem die Proben mit der Sägezahnseite nach unten auf die unterschiedlichen Substrate gesetzt, mit je vier unterschiedlichen definierten Gewichten (0g-400g) belastet und tangential über das jeweilige Substrat gezogen wurden (mindestens 30 mm bei 1 mm/s). Aus den resultierenden Reibkurven wurde die Gleitreibungskraft ab der dritten Sekunde des Experiments durch Mittelung der Zugkraft errechnet. Aus allen Reibkraftmessungen einer Proben-Substrat-Kombination wurde der Reibkoeffizient mithilfe von linearer Regression ermittelt. [23]

Ergebnisse und Diskussion

Zur Charakterisierung der Anisotropie der Reibpaare wird die Reibanisotropie $\Delta\mu$ verwendet. Dabei beschreibt $\Delta\mu$ die Differenz der Reibkoeffizienten der Probe mit (along) und gegen (against) die Sägezahnstruktur: $\Delta\mu = \mu_{\text{against}} - \mu_{\text{along}}$.

Wir gehen davon aus, dass die Reibeigenschaften des betrachteten Systems primär durch zwei Effekte erzeugt werden: Mechanisches

Verhaken der Sägezahnstruktur in der Oberflächenrauheit des Substrats [16–20] sowie kontaktflächenabhängige Adhäsionskräfte [21,22]. Je nach Proben-Substrat-Kombination ist jeweils einer dieser Effekte für die Reibeigenschaften des Systems bestimmend. Bei einem Wechsel einer der Parameter des Systems – beispielsweise Änderung des Aspektverhältnisses der Sägezähne, Änderung der Elastizität des verwendeten Materials oder Änderung der Oberflächenrauheit des Substrats –, kann der systembestimmende Effekt ebenfalls wechseln und zu einer Inversion der Reibungsanisotropie führen.

Einfluss der Materialelastizität

Bei den Proben mit einem niedrigen Aspektverhältnis ist bei einem Wechsel der Materialelastizität von weich zu steif auf den weichen Substraten eine Inversion der Reibungsanisotropie zu beobachten (siehe Abbildung 3a). Während für eine steife Probe die Zugrichtung entgegen der Sägezahnstruktur höhere Reibkräfte erzeugt, als wenn mit der Struktur gezogen wird, ist dieses für die weiche Probe umgekehrt: Hier treten die höheren Reibkräfte dann auf, wenn mit der Sägezahnstruktur gezogen wird. Dies lässt sich durch die beiden systembestimmenden Effekte erklären. Die steifen Proben bleiben während des Zugversuches in sich fest und können sich dadurch gut mit der Substratrauheit verhaken, wohingegen die weichen Proben sich stark deformieren können. Wenn mit den Sägezähnen gezogen wird, erhöht sich dadurch die Kontaktfläche mit dem Substrat stark, sodass die kontaktflächenabhängige Adhäsion die Reibungsanisotropie dominiert (siehe Abbildung 3b).

Einfluss des Aspektverhältnisses

Wenn die weichen Proben über steife Substrate gezogen werden, ist eine Inversion der Reibungsanisotropie zu beobachten, wenn die Aspektverhältnisse der Sägezähne verändert werden (siehe Abbildung 3c). Auf der rauhesten Oberfläche zeigt sich eine positive Reibungsanisotropie für das niedrigste Aspektverhältnis und eine negative Reibungsanisotropie für das mittlere und hohe Aspektverhältnis.

Dies ist dadurch zu erklären, dass die niedrige Probe weniger nachgiebig ist und sich während des Zugversuches kaum deformiert, sodass sie sich im rauhen Substrat stark verhaken kann und höhere Reibkräfte aufweist, wenn sie gegen die Sägezahnstrukturen gezogen wird.

Die mittleren und hohen Aspektverhältnisse dagegen verformen sich aufgrund ihrer längeren Zähne stärker, was eine größere Anpassung an

das Substrat und dadurch eine größere Kontaktfläche erzeugt, wenn mit den Strukturen gezogen wird (siehe Abbildung 3d).

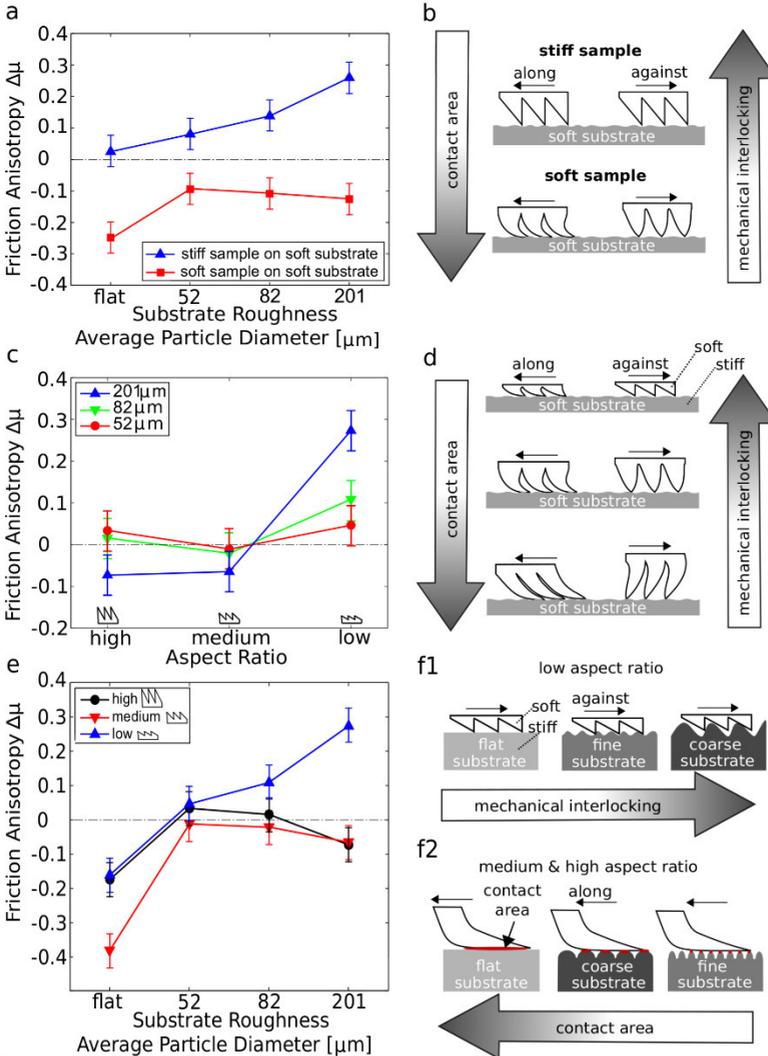


Abb. 3: Reibanisotropie und dominierende Effekte für die jeweiligen Experimente mit variierender Steifigkeit (a, b), veränderlichem Aspektverhältnis (c, d) und wechselnder Substratrauhigkeit (e, f1, f2) nach [23].

Einfluss der Substratrauheit

Ein alleiniger Wechsel der Substratrauheit bewirkt für die weichen Sägezahnproben ebenfalls eine Inversion der Reibungsanisotropie (siehe Abbildung 3e). Bei den Proben mit dem niedrigen Aspektverhältnis ist auf der glatten Oberfläche eine negative und auf der rauhesten Oberfläche eine positive Reibungsanisotropie zu beobachten. Ursache hierfür ist das mechanische Verhaken der Sägezahnprofile in den Substratunebenheiten. Mit zunehmender Partikelgröße der Substratoberfläche nimmt der Effekt des mechanischen Verhakens zu, bis er bei dem rauhesten Substrat die Reibanisotropie deutlich dominiert (siehe Abbildung 3f1).

Auch die Sägezahnstrukturen mit mittlerem und hohem Aspektverhältnis lassen je nach Substratrauheit unterschiedliche Reibeigenschaften beobachten. Auf glattem und sehr rauhem Substrat zeigen diese Strukturen eine stark negative Reibungsanisotropie, auf den mittleren Substratrauhigkeiten jedoch nur eine sehr geringe Anisotropie. Dies lässt sich durch die größere Nachgiebigkeit der Sägezähne der höheren Aspektverhältnisse erklären. Die weichen Spitzen deformieren sich während des Zugversuches, sodass sich auf dem glatten Substrat die Kontaktfläche erhöht. Auf dem rauhesten Substrat zeigt sich das gleiche Verhalten, da die Unebenheiten des Substrats so groß sind, dass sich die Proben auch hier anschmiegen und so hohe Reibkräfte erzeugen können. Auf den feineren Substraten hingegen können sich die Proben weniger stark anpassen, was zu einer Verminderung der Reibungsanisotropie führt (siehe Abbildung 3f2).

Fazit

Schon mit unserer vergleichsweise einfachen anisotropen Oberflächenstruktur konnten wir zeigen, dass eine Reibungsanisotropie sich nicht ausschließlich durch die asymmetrische Oberflächentopographie ergibt, sondern vielmehr durch das Zusammenspiel einer Vielzahl von Faktoren des Reibsystems bestimmt wird. Durch das Anpassen verschiedener solcher Faktoren konnten wir die Reibungsanisotropie nicht nur modifizieren, sondern bei bestimmten Proben-Substrat-Kombinationen sogar invertieren – die bevorzugte Bewegungsrichtung der Sägezahnoberfläche kehrt sich um! Dies ist beispielsweise dann relevant, wenn es die Funktionsweise von biologischen Strukturen zu deuten gilt, da nicht nur die Topographie der Struktur, sondern auch ihre mechanischen Eigenschaften sowie ihre Umgebung berücksichtigt werden müssen.

Darüber hinaus kann dieses Wissen über die Eigenschaften der Strukturen und Materialien eines Reibsystems einen großen Beitrag zu der effizienten Entwicklung von künstlichen anisotropen Strukturen leisten, indem die möglichen Reibeigenschaften in unterschiedlichsten Umgebungen nicht nur vorhergesagt, sondern aktiv ausgenutzt werden können, um je nach Anforderung die jeweils passende Probenorientierung für die Bewegung auf unterschiedlichsten Substraten bevorzugen zu können.

Quellen

- [1] Manoonpong P, Petersen D, Kovalev A, Wörgötter F, Gorb SN, Spinner M, Heepe L. 2016 Enhanced locomotion efficiency of a bioinspired walking robot using contact surfaces with frictional anisotropy. *Sci. Rep.* 6, 39455. (doi:10.1038/srep39455)
- [2] Motta P, Habegger ML, Lang A, Hueter R, Davis J. 2012 Scale morphology and flexibility in the shortfin mako *Isurus oxyrinchus* and the blacktip shark *Carcharhinus limbatus*. *J. Morphol.* 273, 1096–1110. (doi:10.1002/jmor.20047)
- [3] Baum MJ, Heepe L, Fadeeva E, Gorb SN. 2014 Dry friction of microstructured polymer surfaces inspired by snake skin. *Beilstein J. Nanotechnol.* 5, 1091–1103. (doi:10.3762/bjnano.5.122)
- [4] Greiner C, Schäfer M. 2015 Bio-inspired scale-like surface textures and their tribological properties. *Bioinspir. Biomim.* 10, 044001. (doi:10.1088/1748-3190/10/4/044001)
- [5] Hiller U. 1968 Untersuchungen zum Feinbau und zur Funktion der Haftborsten von Reptilien. *Zoomorphology* 62, 307–362. (doi:10.1007/BF00401561)
- [6] Wolff J, Gorb SN. 2016 Attachment structures and adhesive secretions in arachnids. NewYork, NY: Springer.
- [7] Gorb SN. 2001 Attachment devices of insect cuticle. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [8] Wen L, Weaver JC, Lauder GV. 2014 Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *J. Exp. Biol.* 217, 1656–1666. (doi:10.1242/jeb.097097)
- [9] Boesel LF, Greiner C, Arzt E, del Campo A. 2010 Gecko-inspired surfaces: a path to strong and reversible dry adhesives. *Adv. Mater.* 22, 2125–2137. (doi:10.1002/adma.200903200)

- [10] Das S, Cadirov N, Chary S, Kaufman Y, Hogan J, Turner KL, Israelachvili JN. 2015 Stick-slip friction of gecko-mimetic flaps on smooth and rough surfaces. *J. R. Soc. Interface* 12, 20141346. (doi:10.1098/rsif.2014.1346)
- [11] Asbeck AT, Kim S, McClung A, Parness A, Cutkosky MR. 2006 Climbing walls with microspines. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Orlando, FL, 15–19 May. Piscataway, NJ: IEEE.
- [12] Mróz Z, Stupkiewicz S. 1994 An anisotropic friction and wear model. *Int. J. Solids Struct.* 31, 1113–1131. (doi:10.1016/0020-7683(94)90167-8)
- [13] Filippov AE, Vanossi A, Urbakh M. 2010 Origin of friction anisotropy on a quasicrystal surface. *Phys. Rev. Lett.* 104, 074302. (doi:10.1103/PhysRevLett.104.074302)
- [14] Gnecco E, Fajardo OY, Pina CM, Mazo JJ. 2012 Anisotropy effects in atomic-scale friction. *Tribol. Lett.* 48, 33–39. (doi:10.1007/s11249-012-9923-x)
- [15] Chen S, Gao H. 2007 Bio-inspired mechanics of reversible adhesion: orientation-dependent adhesion strength for non-slipping adhesive contact with transversely isotropic elastic materials. *J. Mech. Phys. Solids* 55, 1001–1015. (doi:10.1016/j.jmps.2006.10.008)
- [16] Marvi H, Hu DL. 2012 Friction enhancement in concertina locomotion of snakes. *J. R. Soc. Interface* 9, 3067–3080. (doi:10.1098/rsif.2012.0132)
- [17] Baum MJ, Kovalev AE, Michels J, Gorb SN. 2014 Anisotropic friction of the ventral scales in the snake *Lampropeltis getula californica*. *Tribol. Lett.* 54, 139–150. (doi:10.1007/s11249-014-0319-y)
- [18] Bullock JMR, Federle W. 2011 The effect of surface roughness on claw and adhesive hair performance in the dock beetle *Gastrophysa viridula*. *Insect Sci.* 18, 298–304. (doi:10.1111/j.1744-7917.2010.01369.x)
- [19] Song Y, Dai Z, Wang Z, Ji A, Gorb SN. 2016 The synergy between the insect-inspired claws and adhesive pads increases the attachment ability on various rough surfaces. *Sci. Rep.* 6, 26219. (doi:10.1038/srep26219)
- [20] Dai Z, Gorb SN, Schwarz UJ. 2002 Roughness dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae). *J. Exp. Biol.* 205, 2479–2488.
- [21] Persson BNJ. 2016 Silicone rubber adhesion and sliding friction. *Tribol. Lett.* 62, 34. (doi:10.1007/s11249-016-0680-0)
- [22] Heise R, Popov VL. 2010 Adhesive contribution to the coefficient of friction between rough surfaces. *Tribol. Lett.* 39, 247–250. (doi:10.1007/s11249-010-9617-1)

[23] Tramsen HT, Gorb SN, Zhang H, Manoonpong P, Dai Z, Heepe L. Inversion of Friction Anisotropy in a Bio-Inspired Anisotropically Structured substrate J. R. Soc. Interface 2018;15(138) (doi:10.1098/rsif.2017.0629)



Halvor T. Tramsen

*Funktionelle Morphologie und Biomechanik,
Zoologisches Institut, Christian-Albrechts-Universität zu
Kiel*

htramsen@zoologie.uni-kiel.de

2014

B. Sc. Physik
Georg-August-Universität Göttingen

2016

M. Sc. Physik,
Georg-August-Universität Göttingen

Aktuell

Promotion: Biological Inspiration for Friction
Maximization

Umschlaggestaltung: B-I-C Hochschule Bremen

Titelfotos:

B-I-C; studentische Projektarbeiten - Studiengang Bionik; Käfer - Fauna Germanica (1908), E. Reitter; pixelio.de: Regentropfen, Rainer Sturm und Ratte, Isabella Müller.

"Bionik: Patente aus der Natur"

9. Bremer Bionik Kongress 2018 – Tagungsbeiträge

Hrsg.: Antonia B. Kesel, Doris Zehren

Zu beziehen über:

Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C)

Hochschule Bremen

Neustadtswall 30

D - 28199 Bremen

Tel: +49-(0)421-5905-2525, Fax: +49-(0)421-5905-2537

E-Mail: info@gtbb.net, <http://www.gtbb.net>

Der Kongress (26.10 - 27.10.2018) war eine Gemeinschaftsveranstaltung der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik GTBB e.V., des Bionik-Innovations-Centrums B-I-C der Hochschule Bremen sowie des Bionik-Kompetenz-Netztes BIOKON e.V..

ISBN 978-3-00-061443-9

Bionik-Innovations-Centrum B-I-C – Bremen 2018.

Druck: Meiners-Druck Bremen.

1. Auflage 2019

Bionik: Patente aus der Natur

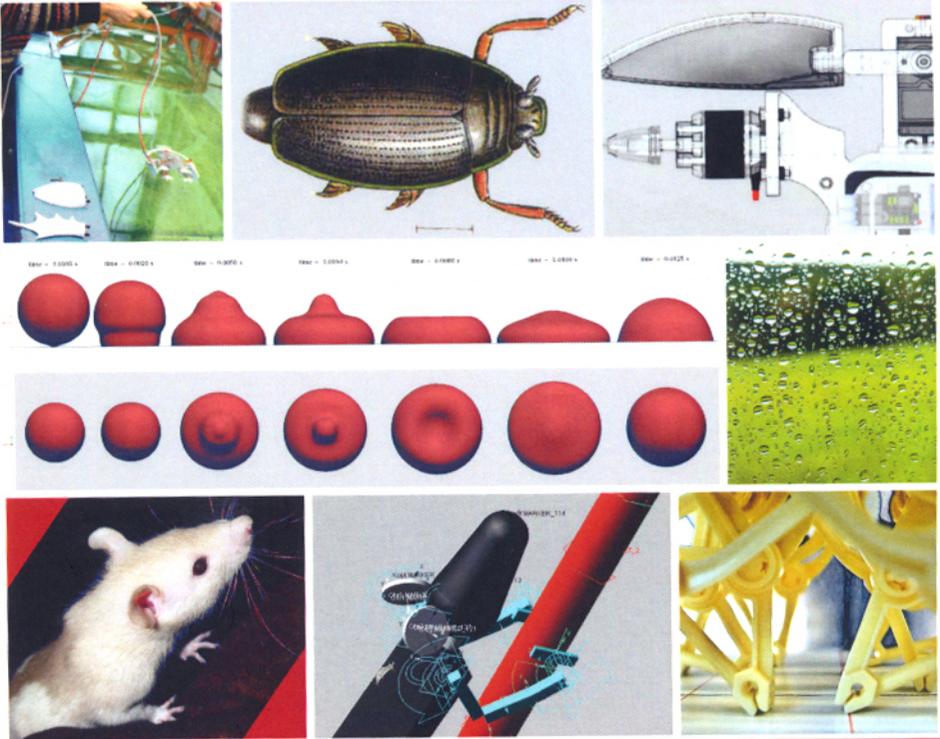
Tagungsbeiträge

9. Bionik-Kongress

Innovations- und Nachhaltigkeitspotenziale für Technologieanwendungen

Hochschule Bremen
26. – 27. Oktober 2018

Hrsg.: Antonia B. Kesel, Doris Zehren
Bionik-Innovations-Centrum Bremen



inkl. CD



GTBB
Gesellschaft für
Technische Biologie
und Bionik.v.



B-I-C
Hochschule Bremen
Bionik-Innovations-Centrum

BIKON
BIONIK KOMPETENZ NETZ