

Schlussbericht

Auftragnehmer: Max-Planck-Institut für Metallforschung
Stuttgart, Prof. Dr. Stanislav N. Gorb **Kennzeichen:** 01R10633C

Auftragsbezeichnung: Verbundvorhaben „Bionisch inspirierter Kletterroboter für die externe Inspektion linearer Strukturen (InspiRat), Teilvorhaben 3: Funktionelle Morphologie des Mikrogreifens“

Laufzeit des Auftrags: 1.10.2006 – 30.09.2009

Berichtszeitraum: 1.10.2006 – 30.09.2009

Inhalt

I. Kurzdarstellung	03
I.1. Aufgabenstellung.....	03
I.1.1. Forschungsziel.....	03
I.1.2. Wissenschaftlich-technische Arbeitsziele.....	03
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	03
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	03
I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	04
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	05
II. Eingehende Darstellung	05
II.1. Erzieltes Ergebnis.....	05
II.1.1. Biologische Haftmechanismen, Identifikation der Kontaktmechanismen.....	05
II.1.1.1. Haften auf tubularen Substraten: Insekten (hexapod).....	05
II.1.1.2. Haften auf tubularen Substraten: Reptilien, Bsp. Chamäleons (quadropod).....	06
II.1.1.3. Haften auf glatten und rauen Substraten, Bsp. Kartoffelkäfer.....	06
II.1.1.4. Kontaktbildung der terminaler Kontaktelemente, Bsp. Ampferblattkäfer.....	07
II.1.1.5. Kontaktbildung auf „kontaminierten“ Oberflächen: Visualisierung und Quantifizierung der Schmierschicht (Grease) auf Insektenkutikula.....	08
II.1.1.6. Adhäsive Eigenschaften glatter Haftsysteeme.....	09
II.1.2. Methodenentwicklung: Flach-auf-Flach Testschema für die Charakterisierung von Adhäsion und Reibung.....	10
II.1.3. Entwicklung, Realisation, Optimierung und Dokumentation technischer Kontaktmechanismen.....	11
II.1.3.1. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion auf Glas.....	11
II.1.3.2. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion auf verschmutzten Oberflächen.....	12
II.1.3.3. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion unter Wasser.....	12
II.1.3.4. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Reibung.....	13
II.1.3.5. Hexagonale Oberflächenmikrostrukturen für trockene und feuchte Reibung.....	13
II.1.3.6. Materialscreening: Erprobung Fußmaterial, Materialanalyse.....	15
II.2. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit.....	16
II.2.1. Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien.....	16
II.2.2. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten.....	16
II.2.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	16
II.3. Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	16
II.4. Veröffentlichungen.....	17
II.4.1. Wissenschaftliche Publikationen.....	17
II.4.2. Sekundärliteratur (Auswahl)/Öffentlichkeitsarbeit.....	19

II.4.3. Teilnahme an Konferenzen und anderen Veranstaltungen	20
II.4.3.1. Konferenzen	20
II.4.3.2. Eingeladene Vorträge	21
II.4.3.3. Veranstaltungen mit materieller und personeller Beteiligung	22

I. Kurzdarstellung

I.1. Aufgabenstellung

Die Antragsteller (vgl. I.5.) haben sich zu einem Verbundprojekt zusammengefunden, um den zukunftssträchtigen Markt der bionisch inspirierten Kletterrobotik von Deutschland aus in seiner gesamten Breite von der Grundlagenforschung bis zum Produkt wesentlich mitzubestimmen. Schwerpunkt im Teilvorhaben 3 war die Ergründung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten und tribologischer Eigenschaften in Haftsystemen.

I.1.1. Forschungsziel

Die Antragsteller stellten sich als gemeinsames Ziel, das quadropede Klettern grundlegend verstehen zu wollen und die Ergebnisse für die Umsetzung in einen biologisch inspirierten Kletterroboter namens „InspiRat“ zu nutzen. Erstmals sollte unter Anwendung verschiedener Analysetechniken eine systematische Untersuchung des Kletterns unter kinematischen und dynamischen Aspekten erfolgen, wobei sich Teilvorhaben 3 auf die Haftorgane konzentrierte.

I.1.2. Wissenschaftlich-technische Arbeitsziele

Übergreifend technisches Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung eines kleinen bis mittelgroßen Kletterroboters nach dem Vorbild kletternder vierbeiniger Wirbeltiere. Mit dem Projekt „InspiRat“ sollte der Nachweis der Einsetzbarkeit eines Kletterroboters nach dem Vorbild eines kleinen Wirbeltiers für zwei ausgewählte Applikationsszenarien erbracht werden. Diese Szenarien zielten und zielen insbesondere auf Einsatzbereiche, die für eine Inspektion durch den Menschen nicht oder nur schwer zugänglich sind (enge Kabel- und Rohrleitungsschächte in hochtechnisierten Gebäuden und Anlagen und in baulichen Altbeständen, kontaminierte Bereiche). Die Maschine sollte auf unterschiedlichen Substraten mit variablen Durchmessern klettern können. Hier setzten die Projektaufgaben Teilvorhaben 3 an: die Herausforderung im bestand darin, in Haftsystemen optimierte Kombinationen von Oberflächenstrukturen und tribologischen Eigenschaften aufzudecken sowie die Zusammenhänge zwischen Ultrastruktur und Reibungs- und Hafteigenschaften in Zusammenhang mit ihrer biomechanischen (makroskopischen) Nutzung zu stellen. Ferneres Ziel war der Nachbau von Oberflächenmustern und die Erprobung von deren Materialeigenschaften.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Antragsteller (vgl. I.5.) sind international ausgewiesene Spezialisten in ihren Fachgebieten und führten schon im Vorfeld erfolgreich kooperative Projekte durch. Darüber hinaus sind sie aktive Mitglieder des Biokon e.V. Der Auftragnehmer Prof. Dr. Gorb sollte seine Expertise zu Mikrohaft- und greifmechanismen im Teilvorhaben 3 des Verbundprojekts InspiRat einbringen. Seine langjährige interdisziplinäre Arbeitsweise resultiert in einer innovativen effizienten Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Themenschwerpunkte und Kernkompetenzen liegen in

- der Zoologie und Evolutionsbiologie (vergleichende Untersuchungen der funktionellen Oberflächen bei Tieren),
- der biologischen Mikro- und Nanotribologie (Reibung und Adhäsion der Oberflächen) und
- der Entwicklung künstlicher Oberflächen mit definierten tribologischen Eigenschaften.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Arbeitspakete für Teilvorhaben 3 bestanden in

- a) der Identifikation der Kontaktmechanismen,
- b) der Entwicklung technischer Kontaktmechanismen,
- c) der Realisation technischer Kontaktmechanismen,
- d) der Optimierung technischer Kontaktmechanismen und
- e) der Dokumentation technischer Kontaktmechanismen.

Die geplanten **Meilensteine** des Teilvorhaben 3 betreffend, lauteten

- (1) Analyse Substratkontakt (Vorbilderauswahl, Versuchsvorbereitung, Struktur-analyse);
- (2) Analyse Substratkontakt (Mechanikanalyse, Prinzipienauswahl, Dokumentation biologischer Haftmechanismen);
- (3) Substratkontakt (Auswahl der Technologie);
- (4) Synthese Systemkomponenten (Kontaktmechanismen: Prototypen Haftelemente testen, charakterisieren, optimieren);
- (5) Demonstration grundsätzlich funktionsfähig (Kontaktmechanismen: aufgaben-adäquate Haftelemente verfügbar) sowie
- (6) Demonstratoren (Optimierung).

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In einer Vielzahl von Bauten existieren bauliche und technische Altbestände, deren Kommunikations- und Versorgungsnetze dokumentiert, kontrolliert bzw. ersetzt werden müssen. Dokumentationen hierzu sind eher eine Seltenheit und die Leitungen sind oft schwer zugänglich für eine direkte Inspektion. Somit wäre es für diese Wartungs- und Dokumentationsarbeiten hilfreich, eine Maschine wie „InspiRat“ zur Verfügung zu haben, die autonom Kabel oder Rohrleitungen von außen inspizieren kann. Bisherige Kletterroboter sind für die Inspektion und Reinigung glatter Wände (Fensterscheiben, Beton- oder Stahlflächen) mit Saugnapfen ausgelegt. Demzufolge konzentrieren sich auch bisherige Forschungsarbeiten zu notwendigen Roboterhaftmechanismen auf Strukturen, welche auf ebene und glatte Flächen angepasst sind. Greifsysteme für tubulare und raue Substrate blieben weitgehend unbeachtet und sollten im Verbundvorhaben „Inspirat“ eingehend betrachtet werden. Hierfür bieten biologische Greifmechanismen hervorragende Vorbilder, was das erfolgreiche Überleben von beispielsweise Heuschrecken oder Chamäleons zeigt. Die Oberflächenstruktur solcher Greifmechanismen ist in der Literatur beschrieben und lässt auf eine enorme Vielfalt von Mikrostrukturen schließen (z. B. Gorb 2001, Scherge & Gorb 2001). Hinsichtlich ihrer Funktion und Materialeigenschaften fehlen weitgehend experimentelle Nachweise. Doch zweifelsfrei sind funktionelle Lösungen in verschiedenen Gruppen unabhängig voneinander entstanden und viele Tierarten sind mit unterschiedlichen Strukturen ausgestattet, deren artspezifische Morphologie für die Erhöhung der Reibungskräfte besonders geeignet ist. Anpassungen an Habitate und Lebensweisen gelten als Einflussfaktoren auf die Ausprägung von Reibungssystemen in jeder bestimmten Art. Acht Grundklassen von Bauprinzipien biologischer Haft- und Verklammerungssysteme sind bekannt: Haken, Verschluss, Klemme, Spreize, Saugnapf, Expansionsanker, haftende Sekretionen (Klebstoff) und Reibung (Gorb 2006). Außerdem treten Kombinationen dieser Prinzipien auf. Nicht zu unterschätzen ist die Einbindung der mikroskopischen Kontaktmechanismen in kinematische (makroskopische) Abläufe (Gorb & Scherge 2000).

In den meisten Greifsystemen ist das Prinzip der Reibung zu vermuten. Mithilfe unterschiedlicher Typen von Mikro- und Nanostrukturen wird Reibung zwischen zwei Oberflächen erhöht und führt zur Fixierung oder Bewegungseinschränkung. Einige Reibungssysteme und ihre Funktionen wurden in der Literatur beschrieben (Nachtigall 1974), aber mechanisch-materiell experimentell sind sie kaum untersucht. Bisherige Ergebnisse lassen vermuten, dass die Oberfläche eines biologischen Reibungssystems aus besonderen Mikrostrukturen und entsprechenden mechanischen Eigenschaften kombiniert ist.

Ausgewählte Literatur:

Bücher

Gorb S. N. (2001) Attachment devices of insect cuticle. Dordrecht et al., Kluwer, 305pp.

Nachtigall W. (1974) Biological mechanisms of attachment. Berlin, Heidelberg, New York:Springer-Verlag, 194pp.

Scherge M., Gorb S. N. (2001) Biological micro- and nanotribology. Berlin et al., Springer, 300pp.

Artikel

Gorb S. N. (1998) The design of the fly adhesive pad: distal tenent setae are adapted to the delivery of an adhesive secretion. Proc. Roy. Soc. London B 265:747-752.

Gorb S. N. (1999) Ultrastructure of the thoracic dorso-medial field (TDM) in the elytra-to-body arresting mechanism in tenebrionid beetles (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Morphol. 240:101-113.

Gorb S. N. (1999) Evolution of the dragonfly head-arresting system. Proc. Roy. Soc. London B 266:525-535.

Gorb S. N. (2006) Functional surfaces in biology - mechanisms and applications. In: Biomimetics: Biologically Inspired Technologies. Ed. by Y. Bar-Cohen. Taylor & Francis: Boca Raton, London, New York: 381-398.

Gorb S. N., Scherge, M. (2000) Ultrastructural architecture and mechanical properties of attachment pads in *Tettigonia viridissima* (Orthoptera, Tettigoniidae). J. Comp. Physiol. A 186:821-831.

Gorb S. N., Gorb E. V., Kastner V. (2001) Scale effects on the attachment pads and friction forces in syrphid flies (Diptera, Syrphidae). J. Exp. Biol. 204:1421-1431.

Scherge, M., Gorb S. N. (2000) Microtribology of biological materials. Tribology Letters 8:1-7.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Teilvorhaben 3 „Funktionelle Morphologie des Mikrogreifens“ war Bestandteil des Verbundvorhabens „Bionisch inspirierter Kletterroboter für die externe Inspektion linearer Strukturen (InspiRat)“ unter der Federführung der Technischen Universität Ilmenau (Prof. Dr. H. Witte) mit Beteiligung der Friedrich-Schiller-Universität Jena (Prof. Dr. M. S. Fischer), der Tetra GmbH (Dr. A. Karguth) in Ilmenau und des Max-Planck-Institutes für Metallforschung in Stuttgart (Prof. Dr. S. N. Gorb). Die Projektpartner arbeiteten auf der Grundlage eines Kooperationsvertrages bei der Projektbearbeitung zusammen. Es erfolgten regelmäßige Absprachen und Rückkopplungen zwischen den Projektpartnern, welche zu den in diesem Bericht separat dargestellten Ergebnissen entscheidend beigetragen haben.

An das am Max-Planck-Institut für Metallforschung durchgeführte Teilvorhaben 3 knüpfen nunmehr die Arbeiten an der Christian-Albrechts-Universität im Erweiterungsprojekt InspiRat an, weil Dr. Stanislav Gorb einem Ruf zum Professor für Funktionelle Morphologie und Biomechanik an das Zoologische Institut der CAU Kiel gefolgt und das Erweiterungsprojekt InspiRat dort angesiedelt ist. Demzufolge wird ein ausführlicher Schlussbericht gemeinsam mit allen Projektpartnern nach Ablauf der Projektlaufzeit (1.10.2009-30.09.2010) erfolgen.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzieltes Ergebnis

II.1.1. Biologische Haftmechanismen, Identifikation der Kontaktmechanismen

II.1.1.1. Haften auf tubularen Substraten: Insekten (hexapod)

Die Haftfähigkeit von Insekten auf Oberflächen ist nicht nur mit den Mikro- und Nanostrukturen ihrer Haftorgane assoziiert, sondern auch in größerem Maßstab mit Kinematik, welche für die Realisierung von Kontaktbildung und -lösung verantwortlich ist. Diesbezüglich wurden die Lokomotionstechniken verschiedener Vertreter mit unterschiedlichen Haftstrukturtypen aus vier Insektenordnungen (Orthoptera, Heteroptera, Coleoptera, Hymenoptera) beschrieben, basierend auf Videoaufnahmen laufender Insekten auf flachen Oberflächen und auf zylindrischen, Pflanzenstängel imitierenden Stäben verschiedener Dicke. Die Haftvorrichtungen der Tarsen und Prätarsen wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop hoch auflösend betrachtet. Die Ergebnisse zeigen auf Substraten mit variierender Krümmung eine unterschiedliche Art und Weise, adhäsive Strukturen einzusetzen (vgl. Abb. 1; Gladun D. and Gorb S.N. (2007) Insect walking techniques on thin stems. Arthropod-Plant Interactions. 1(2): 77-91).

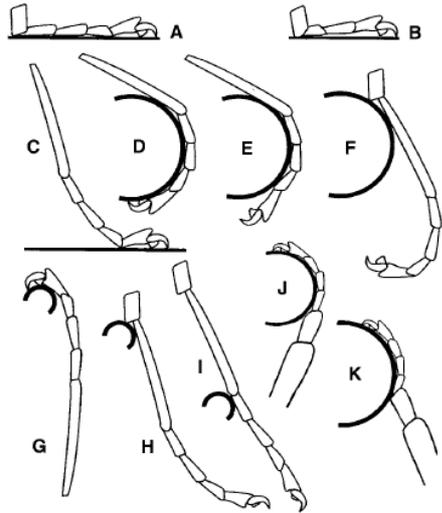


Abb. 1: Methoden der Beinpositionierung bei Insekten während des Laufens auf flachen Substraten und an Stäben.

(A) Tarsus (TA) gerade, distaler Teil der Tibiae (TI), Prätarsus (PT) und alle Tarsomeren (TMs) außer des ersten in Kontakt mit dem Substrat. (B) TA gerade, distaler Teil der TI, des PT und manchmal das basale TM in Kontakt mit dem Substrat. (C) TA ausgestreckt, nur der PT, das erste TM oder der distale Teil des zweiten TM berühren das Substrat. (D) TA gekrümmt, alle TMs (manchmal auch der distale Teil der TI) und die Klauen berühren das Substrat. (E) TA gekrümmt, alle TMs außer des distalen berühren das Substrat. (F) TA gekrümmt, nur die proximalen TMs (manchmal auch der distale Teil der TI) berühren das Substrat. (G) TA gekrümmt, unterstützt durch den PT und das distale TM. (H) TA ausgestreckt, proximale TMs (manchmal auch der distale Teil der TI) berühren das Substrat. (I) TA gerade oder leicht gekrümmt; berührt Substrat mit mittleren TMs. (J) TA gekrümmt, alle TMs außer des basalen berühren das Substrat. (K) Die Kette der TMs vom 1. zum 4. TM gekrümmt und gegen das Substrat gepresst, aber zur TI und basalen TM hin ausgerichtet.

II.1.1.2. Haften auf tubularen Substraten: Reptilien, Bsp. Chamäleons (quadropod)

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden 15 verschiedene Arten der Reptilienfamilie Chamaeleonidae –bekannt für ihre hervorragende Lokomotion und Haftung auf Ästen und Zweigen- auf Ihre Mikrostrukturierung der Körperoberfläche hin rasterelektronenmikroskopisch untersucht und verglichen. An den ventralen Seiten von Schwanz und Füßen finden sich Setae, die eine Haft- und Reibungsfunktion vermuten lassen (Abb. 2). Bezüglich Habitatnutzung, Verwandtschaftsbeziehungen, Körpergewicht und der Ausprägung der Setae konnten bislang keine Zusammenhänge herausgestellt werden. Drei Typen von Setae kristallisierten sich bei den diversen Arten heraus: spitz zulaufend, ohne Spatula, spitz zulaufend, abgeflacht (Übergangsform) und abgeflacht mit Spatula.

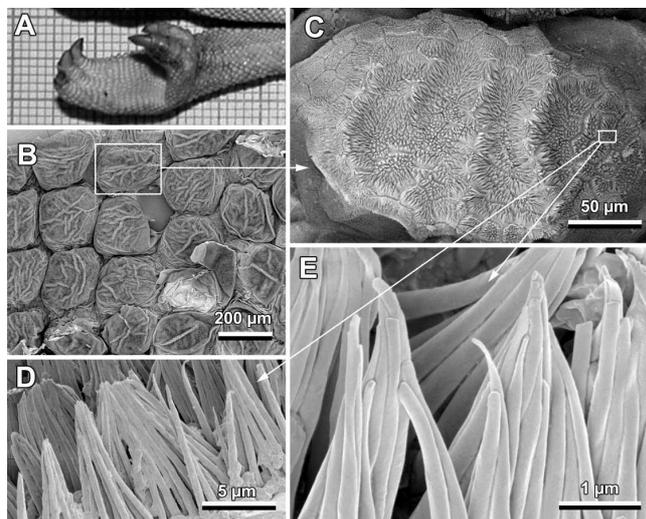


Abb. 2: Haftsystem der Chamaelonidae. A. Greiffuß, digitale Aufnahme (*Chamaeleo dilepis*). B-E. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. E. Ausschnitt der Fußoberfläche mit Schuppen (*Furcifer campani*). C. Einzelne mit Hafthaaren (Setae) bedeckte Schuppe im Detail (*Chamaeleo [Tiroceros] feae*). D, E. Setae im Detail (*Chamaeleo dilepis*).

II.1.1.3. Haften auf glatten und rauen Substraten, Bsp. Kartoffelkäfer

Viele Vertreter der Familie der Blattkäfer (Chrysomelidae), zu welcher der Kartoffelkäfer *Leptinotarsa decemlineata* gehört, zeigen einen sexuellen Dimorphismus in der Struktur ihrer Hafthaare (Setae) (Abb. 3). Während Weibchen nur spatelförmige, lanzeolate und zugespitzte Setae besitzen, finden sich bei den Männchen auch solche mit discoiden Endplatten. So stellte sich die Frage, ob die Form der Hafthaare die Reibungskraft männlicher und weiblicher Kartoffelkäfer auf unterschiedlich rauen Oberflächen beeinflusst?

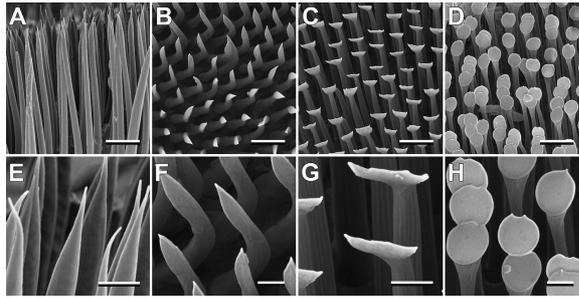


Abb. 3: Typen tarsaler Hafthaare bei *Leptinotarsa decemlineata*, Kryo-raster-elektronenmikroskopische Aufnahmen. A., E. Filamentös. B, F. Lanzeolat. C, G. Spatelförmig. Filamentöse, lanzeolate und spatelförmige wurden bei Weibchen und Männchen beobachtet. D, H. Setae mit discoiden Endplatten (nur bei Männchen). Maßbalken: A-D = 20 µm, E-H = 5 µm

Die maximale Haftkraft der Käfer wurde auf glatten und rauen Kunstharzoberflächen mit einem Zentrifugalkrafttester gemessen. Auf der glatten Oberfläche waren keine beachtlichen Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen zu beobachten. Jedoch auf den rauen Oberflächen, hafteten die Weibchen signifikant, bis zum Zweifachen besser als die Männchen. Käfer mit amputierten Klauen generierten geringere Kräfte als solche mit intakten Klauen. Aber auch hier stellten sich ähnliche Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen heraus.

Die Resultate lassen darauf schließen, dass das Haftsystem der Weibchen eine stärkere Spezialisierung auf raue Pflanzenoberflächen aufweist, während das der Männchen einer gewissen Optimierung unterliegt. Es muss (a) der Haftung an der rauen Pflanzenoberfläche während der Lokomotion in der Vegetation und (b) der Haftung auf der glatten Oberfläche der Weibchen während der Paarung gleichermaßen gerecht werden (Abb. 4). (Voigt, D.; Schuppert, J. M.; Dattinger, S.; Gorb, S. N. 2008 J. Insect Physiol. 54: 765-776.)

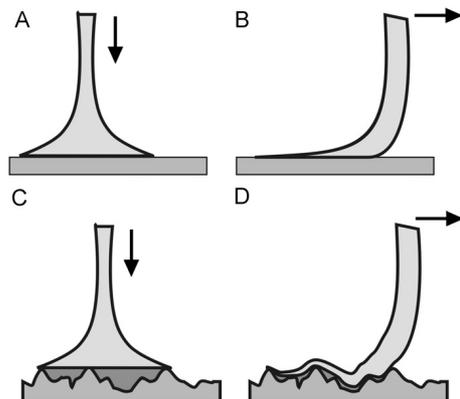


Abb. 4: Wirkungsweise der tarsalen adhäsiven Setae bei *Leptinotarsa decemlineata*. Setae mit discoiden Endplatten (A, C) und spatelförmige Setae (B, D) auf einer glatten (A, B) und rauen (C, D) Oberfläche. Die Pfeile deuten die Richtung der angewendeten Kraft für die Kontaktbildung an.

II.1.1.4. Kontaktbildung der terminaler Kontaktelemente, Bsp. Ampferblattkäfer

Erstmals wurden die terminalen Elemente (Spatulae) der haarigen Haftvorrichtungen der Käferart *Gastrophysa viridula* mittels Transmissionsröntgenmikroskopie (TRM) bei einer Auflösung von ca. 30 nm untersucht. Mit dieser Methode können frische biologische Materialien untersucht werden. Die angehefteten Spatulae wiesen ein viskoelastisches Verhalten auf, welches eine Ausweitung der Kontaktfläche und die Anpassung an die lokale Topographie der Oberfläche ermöglicht (Abb. 5). Die hauchdünne, bandartige feine Struktur der Spatula legt sich über die Oberfläche. Die optische Dichte geht einher mit der Materialdicke, wenn man die gleiche Dichte des Materials der Spatula voraussetzt.

Die Technik kann potenziell als TRM Tomographie angewandt werden, welche dreidimensionale Informationen liefert und einen tieferen Einblick in die Details der Kontaktbildung der Haftvorrichtungen der Insekten erlaubt. (Eimüller, T.; Guttman, P.; Gorb, S. N. 2008 J. Exp. Biol. 211:1958-1963.)

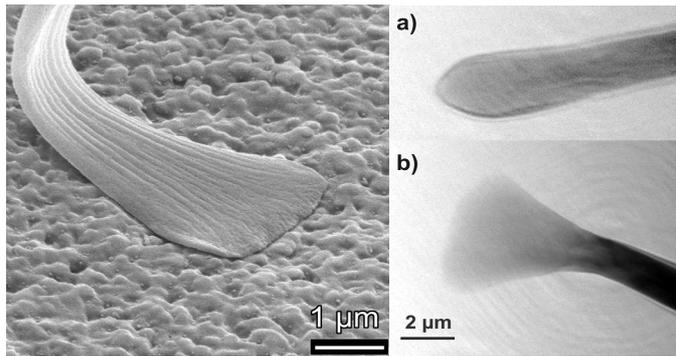


Abb. 5: Links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (REM) eines spatelförmigen Endkontaktelements des Käfers *Gastrophysa viridula* während des Kontaktes mit einer rauen Oberfläche. Rechts: Transmissionsröntgenmikroskopie (TRM) Aufnahmen der Spatulae des Käfers *Gastrophysa viridula*. a) nicht in Kontakt, b) in frischem Kontakt mit einer glatten Si_3N_4 Membran. Beachte die Änderungen der Form und optischen Dichte der Spatulae.

II.1.1.5. Kontaktbildung auf „kontaminierten“ Oberflächen: Visualisierung und Quantifizierung der Schmierschicht (Grease) auf Insektenkutikula

Die Wirkungsweise von Grenzflächenflüssigkeiten im Haftprozess bei Insekten und deren Bedeutung in biomimetischen Haftsystemen ist bislang nicht aufgeklärt. Da es sich um äußerst geringe Mengen und hauchdünne, teilweise flüchtige Schichten von Flüssigkeiten handelt, stellt allein deren mikroskopischer Nachweis eine große Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund wurden am Beispiel des Kartoffelkäfers Studien mit Kryo-Rasterelektronen (Kryo-REM)- und Rasterkraftmikroskop (AFM) durchgeführt (Abb. 6).

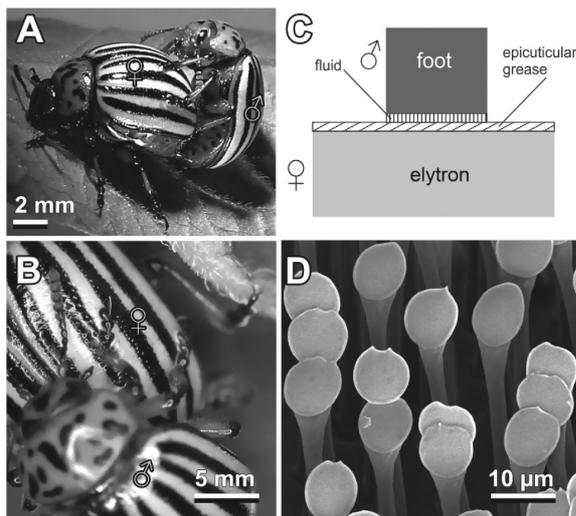


Abb. 6: Haftung im Paarungsverlauf des Kartoffelkäfers *Leptinotarsa decemlineata*. A, B. Typische Paarungsposition, bei der die Füße der Männchen auf den weiblichen Flügeldecken haften. C. Hypothetisches Diagramm der Kontaktbildung zwischen den männlichen Hafthaaren am Fuß (foot) und den weiblichen Deckflügeln (elytron). Zwei Flüssigkeitsschichten zwischen der Kutikula der Hafthaare (fluid) und Deckflügel (epicuticular grease) sind involviert. D. Kryo-REM der männlichen Hafthaare.

Hafthaare männlicher Blattkäfer besitzen scheibenförmige Endkontakte (Fig. 6D) und inspirierten unlängst die Entwicklung eines effektiven Haftbandes mit pilzkopfförmigen Mikrostrukturen (S. Gorb, M. Varenberg, A. Peressadko, and J. Tuma. Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure. *J. R. Soc. Interface* 4 (13):271-2756, 2006).

Die männlichen Hafthaare sind für das Haften auf weiblichen Flügeldecken im Paarungsprozess (Fig. 6A, B) spezialisiert. Studien mit dem Kryo-REM ließen die Bedeckung der Flügeloberfläche mit einem mehr oder weniger kontinuierlichen Schmierfilm erkennen. Durch die Anwendung von drei verschiedenen Modi des AFM (Kontakt, Tapping, Phasenkontrast) konnte erstmalig gezeigt werden, dass das Schmiersekret vielmehr unregelmäßig verteilt ist und an erhabenen Stellen eine Höhe bis zu 8 nm erreicht (Abb. 7). Darüber hinaus ermöglichte die AFM-Messtechnik die Ermittlung der Adhäsionskraft der Schmiersekretschicht von 28 nN. AFM ist demnach eine geeignete Methode, Kutikulaschmierschichten nicht nur hoch aufgelöst zu visualisieren, sondern auch zu quantifizieren. Unter Berücksichtigung der neu gewonnenen Ergebnisse sollten Sekretschichten auf Substraten einen beachtlichen Einfluss auf die Haftung von Insekten ausüben, der künftig noch eingehender erforscht werden muss (Gorb et al. (2008) *Microscopy Today*, 16(3): 42-45 und Voigt et al. (2008) In: B. Bhushan and H. Fuchs (eds.) *Applied Scanning Probe Methods XIII*).

Biomimetics and Industrial Applications. Heidelberg, Springer-Verlag: 1-16).

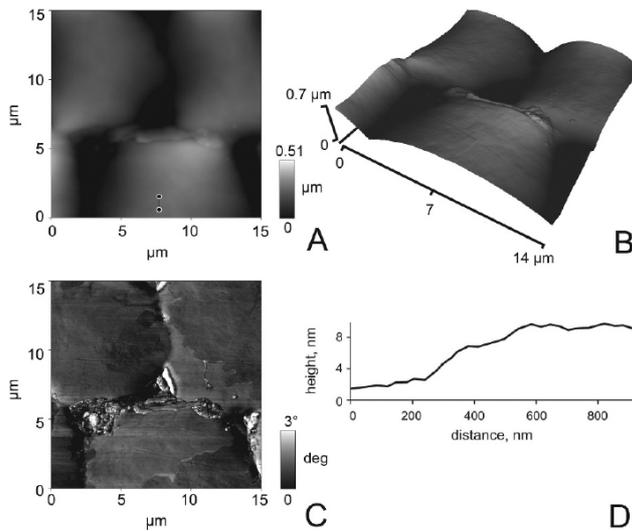


Abb. 7: AFM Tapping-Mode-Aufnahmen auf frischen weiblichen Flügeldecken von *Leptinoarsa decemlineata*. **A.** Höhenbild. **B.** Phasenbild von A, welches durch die Verwendung des Phasenkontrasts Unterschiede in den Oberflächeneigenschaften bzw. der Geometrie zeigt. Die Schmierschichtverteilung (dunklere Stellen) auf einzelnen Zellen der Flügeldecken ist deutlich. **C.** 3D-Phasenbild veranschaulicht die Grenzen der Schmierschicht. **D.** Profil des Höhenbildes entsprechend eines Querschnittes durch die Schmierschicht entlang der Linie zwischen den Punkten in A.

II.1.1.6. Adhäsive Eigenschaften glatter Haftsyste

Während des Screenings geeigneter Haftmaterialien für die InspiRat-Füße kristallisierten sich vor allem „schaumige“ Materialien heraus (II.1.3.6.). Somit wurden in die Exploration biologischer Haftsyste verstärkt auch sogenannte glatte Haftsyste einbezogen, wie das Arolium der Zikade *Lycorma delicatula* (Abb. 8). Solche Haftsyste ließen schon in Vorstudien unterstützende innere Strukturen vermuten. Die Basis der Terminalfläche des Zikadenaroliums bildet korrugate, parasagittale Falten aus. Diese werden durch innere kutikuläre Dendriten unterstützt.

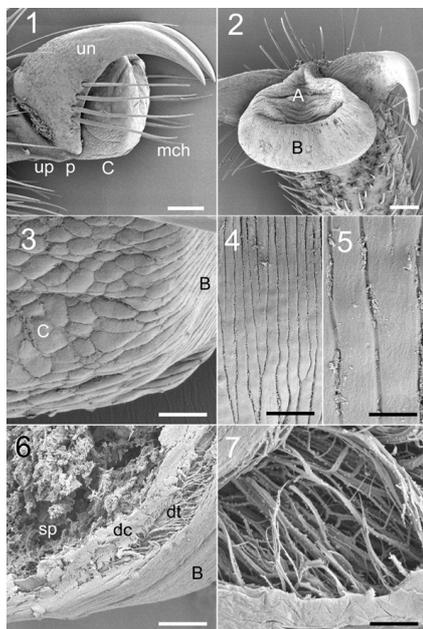


Abb. 8. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Prätarsus von *Lycorma delicatula*: 1. Profil. 2. Vorderansicht. 3. Übergang von der Unterseite (C), bedeckt mit flachen Schuppen, zur Endlippe, mit vertikalen Riefen (B). 4, 5. Vertikale Riefen auf der End. 6. Querschnittenes Arolium, gleiche Zone wie in 3. 7. Dendritenschicht. A. Dorsale Oberfläche des Aroliums. B. Terminale klebrige Lippe. C. Untere Oberfläche des Aroliums. dc – dichte Kutikulaschicht; dt – Dendritenschicht; mch – Setae; p – Planta; sp – schwammige Masse; un – Krallen; up – Unguitraktorplatte. Maßbalken: 100 µm (1, 2), 20 µm (4, 6), 10 µm (3), 5 µm (5), 2 µm (7).

Die Seitenflächen des Aroliums bilden sklerotisierte dorso-laterale Platten. Wenn die Klauen auf einer glatten Oberfläche gleiten und pronieren, dehnen sich die dorso-lateralen Platten aus und erweitern die haftende Endfläche. Die reale Kontaktfläche mit einer Glasplatte wurde durch Lichtreflexion an den Randflächen bestimmt. Die Fläche wurde gemessen. Sie war kleiner, wenn das Bein im rechten Winkel an das Substrat gedrückt wurde ($0,02 \text{ mm}^2$) als wenn es in paralleler Richtung zum Substrat geschert wurde ($0,05 \text{ mm}^2$). Die Haftkräfte wurden mit Hilfe einer dynamometrischen Plattform gemessen während die Insekten aktiv an

horizontalen oder vertikalen Glassoberflächen zogen. Die normale Adhäsionskraft (ca. 9-12 mN) war viel geringer als die Reibungskraft während des Gleitens mit einer Geschwindigkeit von $6-17 \text{ mm}^{\ast\text{s}^{-1}}$ (50-100 mN). Ausgedrückt als Kraft pro Kontaktflächeneinheit war der Unterschied deutlicher: 170 bzw. $375-625 \text{ mN}^{\ast}\text{mm}^{-2}$. Das Gleiten des Aroliums während des Scherens erwies sich als oszillatorisch in einer Standbild-Videoanalyse. Die relativen Oszillationen bestanden aus periodischen sticks-slips (Rutschgleiten) des Aroliums entlang der Glasoberfläche (Abb. 9). (Frantsevich, L.; Ji, Aihong; Dai, Z.; Wang, J.; Frantsevich, L.; Gorb, S. N. 2008 J. Insect Physiol. 54: 818-827.)

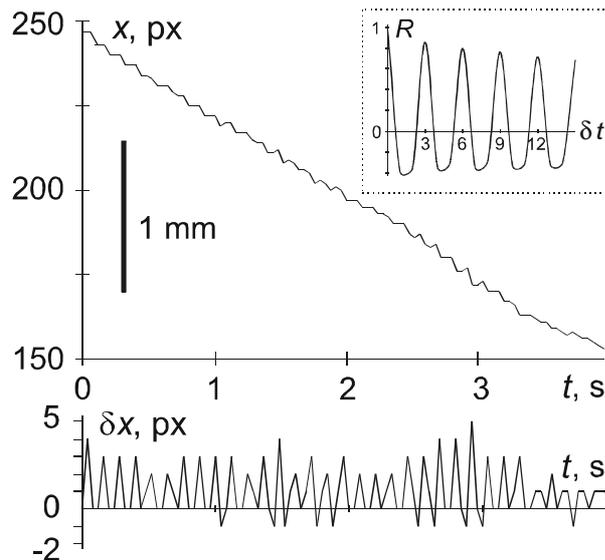


Abb. 9. Stick-slip-Verhalten des Aroliums auf einer Glasplatte.

Der obere Graph zeigt die Aroliumbewegung x in Pixel aufgetragen auf die Zeit t (Auswahl von 1000 Standbildern, Maßbalken: 1 mm). Der untere Graph zeigt die Standbild-zu-Standbild Verschiebung δx in Pixeln aufgetragen auf die Zeit. Das eingefügte Bild oben rechts zeigt die Autokorrelation der Standbild-zu-Standbild Verschiebung ausgedrückt als linearer Korrelationskoeffizient R aufgetragen auf die Zeitverzögerung δt , welche statistische Periodizität aufweist. Die Kalkulation der Autokorrelation basiert auf 374 Standbildern.

Die Materialstruktur des Zikadenarolioms scheint für die Anpassung an verschiedene Substrate und die Generierung der Reibungs- und Adhäsionskräfte besonders geeignet zu sein. Diese Erkenntnisse zeigen deutlich, dass wir uns bei der Auswahl geeigneter InspiRat-Haftmaterialien nicht nur auf die Mikrostrukturierung von Polymeroberflächen, sondern auch auf die Benutzung polymerischer Schaumstoffe konzentrieren sollen. Eine Kombination der Oberflächenstrukturen und einer inneren porösen/faserigen Materialstruktur kann für die gesuchte Funktion als Fußbelag des Roboters von großem Interesse sein.

II.1.2. Methodenentwicklung: Flach-auf-Flach Testschema für die Charakterisierung von Adhäsion und Reibung

Für Performancetests von band- und folienartigen Polymermaterialien auf einer flachen Oberfläche (Boden, Decke, Wand) war es notwendig, eine Messmethode für Kontaktkräfte in verschiedene Richtungen einzuführen. Für diesen Zweck wurde von Dr. M. Varenberg ein innovativer Tribotester (Reibungstester) entwickelt und erfolgreich etabliert (Abb.10).

Das Hauptproblem bei der Verwendung von Flach-auf-Flach Kontaktschemen liegt in der vollen Parallelstellung der Arbeitsflächen. Diese Anforderung kann durch ein passives Selbstausrichtungssystem der Probenhalter mit zwei fadenbasierten, lotrecht rotierenden Freiheitsgeraden gelöst werden. Eine Skizze eines solchen Systems demonstriert Abbildung 4. Jede Probe ist an einem langen straffen Faden befestigt. Dieser kann Drehmomenten nicht widerstehen. Seine Achse liegt planparallel zur Kontaktebene der Proben. Wenn der obere Halter an einem Kraftsensor fixiert ist und der untere Halter an einer beweglichen Plattform, werden demzufolge flache Proben unter kontrollierter Normalbelastung in vollen Kontakt gebracht. Somit können Adhäsion und Reibungskräfte in einem Flach-auf-Flach Schema gemessen werden. Zu bemerken ist, dass aufgrund der planparallelen Anordnung der Rotationsachsen und der Kontaktebene die Reibungskräfte in dieser Ebene keine

Momente erzeugen und somit immer der volle Kontakt zwischen den Oberflächen gegeben ist.

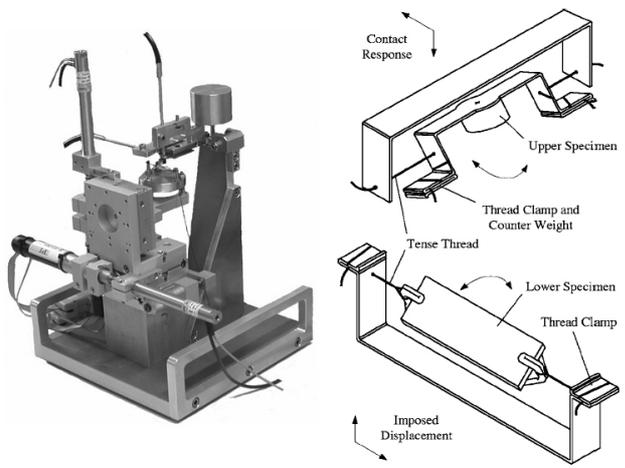


Abb. 10: Links: Innovatives Tribometer für Messungen von Adhäsion und Reibung in Flach-zu-Flach Schemen. Rechts: Schema des Selbstausrichtungssystems der Probenhalter, welches im Tribometer benutzt wurde.

Ein anderes wichtiges Merkmal ist, dass durch die relativ geringe Steifigkeit des Selbstausrichtungsgelenkes eine weit reichende Auslenkung in vertikaler und horizontaler Richtung gegeben ist und somit eine Endlos-Kontrolle benutzt werden sollte, um eine konstante Normalbelastung während der Reibungsmessungen zu erhalten.

Um die vom belastungsabhängigen Anstieg resultierenden Probleme am freien Ende der kraftsensiblen Feder zu vermeiden, kann ein besserer Kraftsensor auf der Basis eines symmetrischen Bauprinzips verwendet werden. Im Gegensatz zu gängigen Doppelblattfedern biegt sich die symmetrische Vierblattfeder parallel zu sich selbst. Somit entstehen keine Messartefakte. Dank ihrer streng definierten Auslenkungsrichtungen kann letztere Feder auch für die Charakterisierung von Materialeigenschaften durch Indentierung genutzt werden.

II.1.3. Entwicklung, Realisation, Optimierung und Dokumentation technischer Kontaktmechanismen

II.1.3.1. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion auf Glas

Biomimetische pilzförmige adhäsive Mikrostrukturen wurden mittels einer Vielfalt von Messtechniken charakterisiert und mit einer flachen, unstrukturierten Kontrolloberfläche desselben Materials verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine mehr als zweifach höhere Abzugskraft und Haftfestigkeit bei strukturierten Proben im Vergleich zu flachen Proben (Abb. 11).

Basierend auf der Kombination verschiedener geometrischer Prinzipien bei biologischen Haftvorrichtungen, stellen die aufgezeigten Mikrostrukturen einen bedeutenden Schritt auf dem Weg der Entwicklung industrieller trockener Haftmaterialien dar. (Gorb S.N., Sinha M., Peressadko A., Daltorio K.A. and Quinn R.D. 2007 Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. *Bioinspiration and Biomimetics*. 2: 117–125).

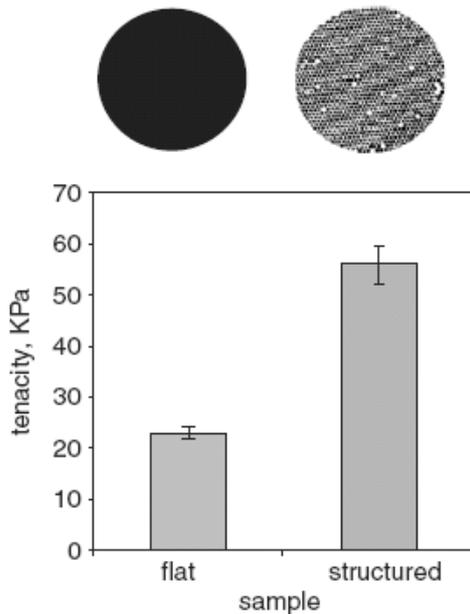


Abb. 11: Ergebnisse der Adhäsionstests zweier verschiedener PVS Proben (flat, flach; structured, strukturiert) entsprechend des Flach-zu-Flach Schemas. Die „Zähigkeit“ (tenacity) spiegelt die Adhäsion normalisiert zu den realen Kontaktflächen zwischen Polymerprobe und Glas wider.

II.1.3.2. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion auf verschmutzten Oberflächen

Im Gegensatz zu flachem Haftband desselben Materials (II.1.3.1.) zeigt sich das strukturierte sehr tolerant gegenüber Kontamination. Es kann seine adhäsiven Eigenschaften nach Waschen in Seifenlösung wiedererlangen (Abb. 12). (Gorb S.N., Sinha M., Peressadko A., Daltorio K.A. and Quinn R.D. 2007 Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. *Bioinspiration and Biomimetics*. 2: 117–125.)

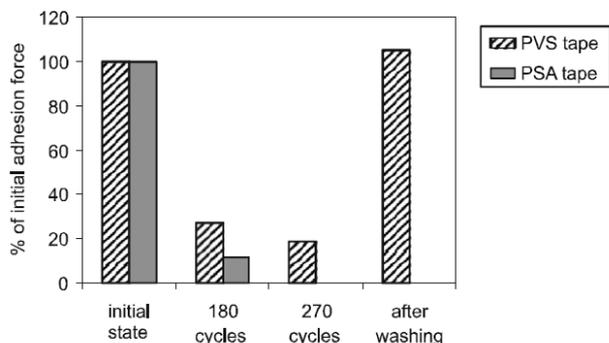


Abb. 12: Änderung der Performance von strukturierten (PVS) und unstrukturierten (PSA) Haftbändern (% of initial adhesion force = % der ursprünglichen Haftkraft) in Abhängigkeit vom Kontaminationsgrad; nach erstmaligem Haften (initial state), nach unterschiedlicher Anzahl von Haftzyklen (180, 270 cycles) und nach dem Waschen in Seifenlösung (after washing) (5 Haftbänder jeden Typs getestet).

II.1.3.3. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion unter Wasser

Mit den pilzförmigen adhäsiven Mikrostrukturen konnte eine klebstofffreie reversible Adhäsion unter Wasser erzielt werden. Die strukturierten Oberflächen wiesen unter Wasser einen 25 %igen Anstieg der Ablösekraft auf. Ihre Unterwasserhaftung war 20fach höher als diejenige der flachen Oberflächen (Abb. 13). Die van-der-Waals Wechselwirkung, welche der Adhäsion der pilzförmigen faserigen Mikrostruktur unterliegt, wird unter Wasser signifikant durch mögliche Saugeffekte erhöht. Dies resultiert in einer höheren Haftfähigkeit des Materials mit potentiellen unter-Wasser-Anwendungen in Robotik, Medizin, Bio- und marine Technologien sowie einer Spannweite anderer Applikationen in wässrig dominierten Millieu. (Varenberg M. and S. Gorb 2007 A beetle-inspired solution for underwater adhesion. *J. R. Soc. Interface*, doi:10.1098/rsif.2007.1171).

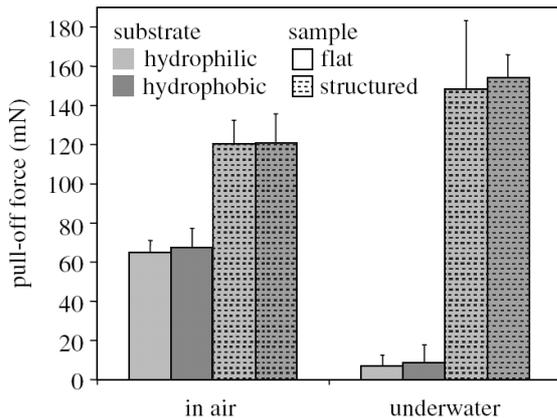


Abb. 13: Performance pilzförmiger adhäsiver Mikrostrukturen in Luft und unter Wasser. Mittlere Ablösekraft (pull-off force) flacher (flat) und strukturierter (structured) Proben auf hydrophilen (hydrophilic) und hydrophoben (hydrophobic) Substraten in Luft (in air) und deionisiertem Wasser (underwater).

II.1.3.4. Performance von bio-inspiriertem Haftband: Reibung

Für die Charakterisierung des Effektes der Scherung auf die Funktion fasriger adhäsiver Mikrostrukturen, wurden reibungs- und scherabhängige Änderungen der Ablösekraft von biomimetischen Polyvinylsiloxan- pilzförmigen adhäsiven Mikrostrukturen geprüft. Im Gegensatz zu einer kontrollierten flachen Oberfläche mit deutlicher stick-slip Bewegung und hoher Reibung, zeigt die fasrige Mikrostruktur eine stabile weiche Gleitung mit ca. vierfach geringerem Reibungskoeffizienten (Abb. 14). Der strukturierte Kontakt ruft keine Ablösekraft im Scherstatus hervor, während die flache Oberfläche eine weit gestreute und unzuverlässige Ablösekraft beim Kontaktscheren aufweist. Es scheint, dass die fasrige Mikrostruktur in Anwendungen genutzt werden kann, wo die totale Haftkraft durch einen binären an/aus-Status generiert werden und wo Elastomer-Reibung stabilisiert und minimiert werden soll. (Varenberg M. and S. Gorb (2007) Shearing of fibrillar adhesive microstructure: friction and shear-related changes in pull-off force. J. R. Soc. Interface 4, 721–725).

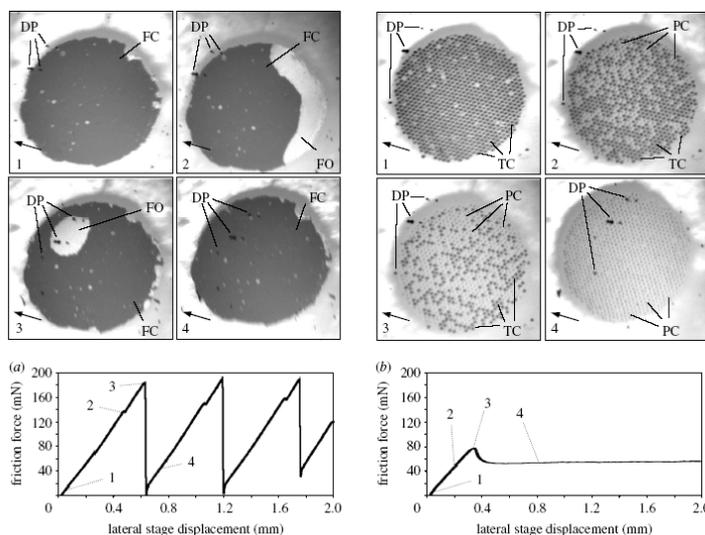


Abb. 14: Reibungskraft (friction force) einer (a) flachen und (b) strukturierten Probe, gemessen als eine Funktion der Auslenkung der lateralen Plattform (lateral stage displacement) unter einer Belastung von 40 mN. a1, a2, a3, a4 = flache Kontaktfläche nach lateralen Auslenkungen von 60, 460, 620 und 720 mm. b1, b2, b3, b4 = strukturierten Kontaktfläche nach lateralen Auslenkungen von 60, 200, 350 und 820 mm. DP, Staubpartikel; FC, flache Oberfläche in Kontakt; FO, flache Oberfläche nicht in Kontakt; TC (dunkelgraue Punkte), terminale Platten in Kontakt; PC (graue Punkte), gekrümmte Säulchen in Kontakt; Pfeile weisen die Richtung, in welche die Probe bewegt wurde.

II.1.3.5. Hexagonale Oberflächenmikrostrukturen für trockene und feuchte Reibung

Fußmaterialien aus polymerischen Schaumstoffen nach dem Vorbild glatter biologischer Haftsysteme haben sich im bisherigen Projektverlauf als besonders geeignet herausgestellt. Eine Kombination von Oberflächenstrukturen und innerer poröser/faseriger Materialstruktur kann für die gesuchte Funktion als Fußbelag des Roboters von großem Interesse sein.

Haftsysteme von beispielsweise Heupferden oder Fröschen erscheinen zwar makroskopisch glatt, weisen jedoch hexagonale Mikrostrukturen auf (Abb. 15A). Deren Funktion wurde in

der Reibungsbeeinflussung vermutet, durch die Vermeidung von Aquaplaning und die Optimierung der Dicke des haftvermittelnden Sekretes. Da sich die Untersuchung dieser Effekte an lebenden Organismen als sehr schwierig gestaltet, wurde auf Polymerproben zurückgegriffen, um experimentelle Studien durchzuführen (Abb. 15B). Die Oberflächenstrukturierung mit definierten hexagonalen Mustern erfolgte unter Verwendung von Stahlmasken der Fa. OVD Kinegram (Zug, Schweiz).

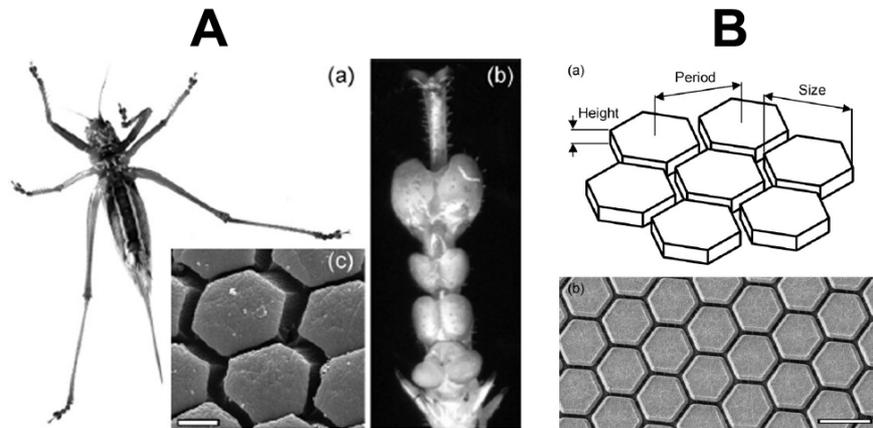


Abb. 15: **A.** Tarsale Haftkissen (Euplantulae) des grünen Heupferdes *Tettigonia viridissima* L. Orthoptera, Tettigoniidae; a) vertikale Position auf einer Glasoberfläche; b) Tarsus des Hinterbeines mit vier Euplantulae; c) Detail der Euplantulaeoberfläche (SEM). **B.** Bio-inspirierte mikrostrukturierte Polymeroberfläche. a) Schema der hexagonalen Kontaktplatten mit gleicher Größe (size) und Intervallen (period) von 10, 20, 50 und 95 mm; mit gleicher Höhe (height) von 1 mm. b) Detail der mikrostrukturierten Oberfläche, Maßbalken 10 mm (SEM).

Mit dem vorher beschriebenen, spezialgefertigten Mikrotribometer mit Selbstausrichtungssystem wurden Reibungstests in Kontakt mit (1) Glas und (2) Mineralöl (Mobil DTE Medium, Viskosität $43,3 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$) durchgeführt (Fig. 16).

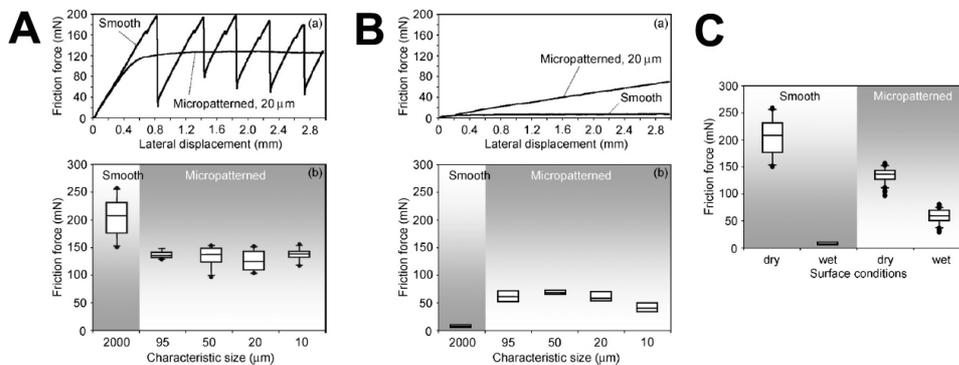


Abb. 16: Reibung auf glatten und mikrostrukturierten Oberflächen (Hexagonintervalle: 10, 20, 50, 95). **A.** Trockene Reibung. **B.** Feuchte Reibung. **C.** Vergleich zwischen trockener und feuchter Reibung mit gemittelten Daten. Jeweils a) charakteristische Reibungskurven als Funktion lateraler Verschiebung und b) komplette Datensätze der maximalen Kraftwerte.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Haftkissen mit mikrostrukturierten Oberflächen fähig sind, sicheren Kontakt mit feuchten und nassen Substraten zu bilden und zu halten. Flüssigkeiten fließen über die Mikrostrukturen aus der Reibfläche ab. Die hexagonale Form der Strukturen gewährleistet die größtmögliche Kontaktfläche, maximale Stabilität und Isotropie, die größte Länge von Abflussrinnen zwischen den Hexagonen und die effektivste Stabilisierung der Elastomerreibung auf trockenen und nassen Substraten.

II.1.3.6. Materialscreening: Erprobung Fußmaterial, Materialanalyse

Im Zuge der Auswahl geeigneter Haftmaterialien für die FüÙe des Kletterroboters wurden Reibungstests (Experimentaldesign vgl. Abb. 17A) mit 16 unterschiedlichen Kunststoffproben (40 x 35 mm) auf 10 verschiedenen Substraten ohne und mit Normalkraft (92 g) durchgeführt.

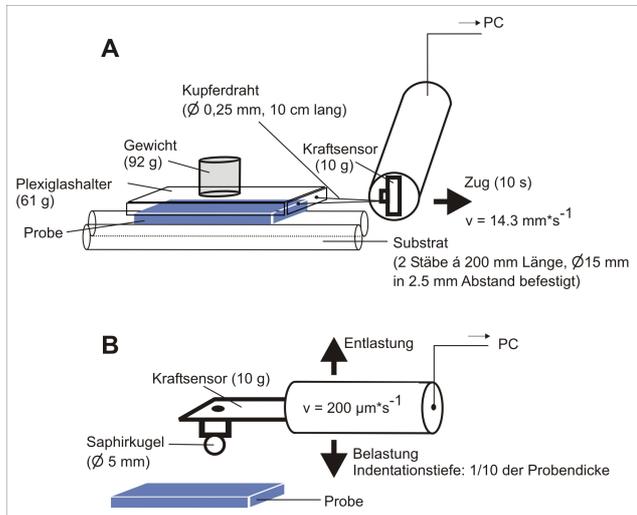


Abb. 17: Experimentaldesign der durchgeführten Tests mit potenziellen Fußmaterialien für RatNic. **A.** Reibungstest, **B.** Steifigkeitsmessungen ($23,5 \pm 1,14 \text{ } ^\circ\text{C}$, $46,8 \pm 3,71 \%$).

Wobei 3 Substrate (Abb. 18A-C) und 9 Proben von der Tetra GmbH sowie ein Substrat und 7 Proben aus der Oberflächendatenbank der Evolutionary Biomaterials Group (MPI Stuttgart) zur Verfügung gestellt wurden (Abb. 19).

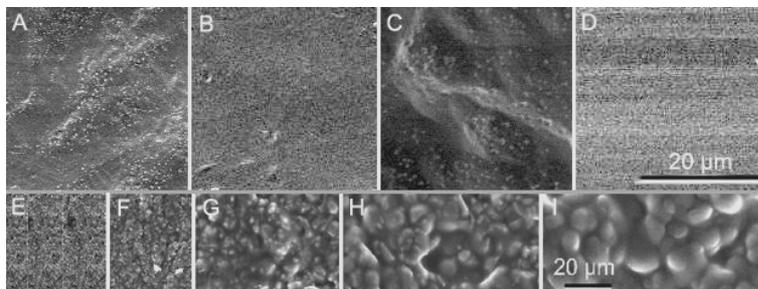


Abb. 18: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen der Substrate im Reibungstest. **A.** Kunststoffrohr. **B.** Kabel isoliert. **C.** Metall. **D.** Glas. **E.-I.** Schleifpapiere; E. 0,3 μm ; F. 1,0 μm ; G. 3,0 μm ; H. 9,0 μm ; I. 12,0 μm . Maßbalken oben für A-D; unten für E-I.

Darüber hinaus wurden Replikationen von Haihaut in Epoxidharz (a. starres Einzelstück, b. kleine bewegliche Teilstücke auf Schaumstoff) in die Tests einbezogen im Hinblick auf deren potenzielle Verwendung als anisotroper, reibungsaktiver Belag im ventralen Bereich des Roboters (Abb. 19E).

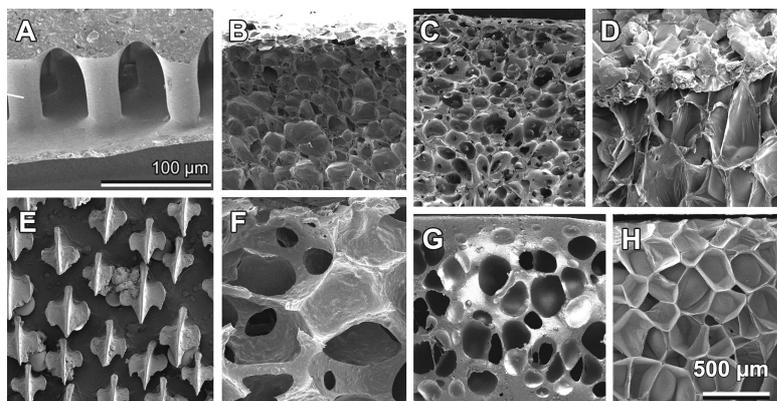


Abb. 19: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Auswahl getesteter Proben von potenziellen Haftmaterialien für RatNic im Querschnitt (außer E). **A.** Sandwichhaftband. **B.** Dicker Schaumstoff. **C.** Fußballhandschuhschaumstoff. **D.** Feines Schleifpapier auf Schaumstoff. **E.** Haihaut-Replika in Epoxidharz, Draufsicht. **F.** Gummi-Dichtungsband. **G.** Schaumgummi-Dichtungsband. **H.** Dünner Schaumstoff. Maßbalken unten rechts für B-H.

Auf die konkreten ermittelten Reibungskoeffizienten und die in einem weiteren Experiment semiquantitativ bestimmte Materialsteifigkeit und die Adhäsionswerte wird im Gesamtabschlussbericht aller Projektpartner nach Ablauf der Projekterweiterungsphase (30.09.2010) eingegangen werden.

Unsere Reibungsexperimente haben deutlich demonstriert, dass jeweils ein glattes und ein strukturiertes Haftband kombiniert mit Schaumstoff als Trägersubstanz die besten Reibungskoeffizienten aufweisen. Das Prinzip des Haftfilms auf einem weichen Substrat wurde durch biologische Haftsysteine inspiriert (vgl. II.1.1.6.). Wir schlagen solche Materialien als sehr gute Kandidaten für die Implementierung in robotischen Greifsystemen vor.

II.2. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit

II.2.1. Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien

Da die Arbeiten des Teilvorhabens 3 in das Verbundprojekt InspiRat einfließen, wird der industrielle Nutzen im Zusammenhang gemeinsam mit allen Projektpartnern im Schlussbericht nach Ablauf der Projekterweiterungsphase (30.09.2010) erörtert. Denkbar ist auch eine Verwendung der erprobten und entwickelten Haftmaterialien außerhalb der Robotik.

Mit 35 wissenschaftlichen Publikationen, über 15 Beiträgen in Printmedien und über 10 Film- und Hörfunksendungen wurde während des Projektes ein Beitrag zur nachhaltigen Sensibilisierung, Information und Involvierung einer sehr breiten Öffentlichkeit bezüglich der Thematik „Bionik und Kletterrobotik“ geleistet (vgl. II.4., S. 17 ff.).

Angefangen beim Bildungssektor, über den wissenschaftlichen Bereich, bis hin zur Industrie, steht einem großen Anwenderkreis somit eine solide Basis von Forschungsergebnissen, (Daten, Grundlagen, Zusammenhänge usw.) zur Verfügung. Langfristig werden interdisziplinäre komplexe Ansätze und systemare Denkweisen geschaffen, geschult und erhalten.

II.2.2. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Der herausragende Erfolg des Verbundprojekts „Inspirat“ beruht auf seinem integrativen Ansatz. Wissenschaft und Technik agieren transdisziplinär zusammen. Dadurch sind auch im Teilvorhaben 3 ein erfolgreicher Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in die Technik und die Synthese innovativer Lösungen gesichert.

Durch enge Zusammenarbeit und aktive Rückkopplungen der Projektpartner und die Bereitstellung neuester Materialien und Ergebnisse erlaubt es, Fragestellungen exakter zu fokussieren und den Transfer in die Technik zu beschleunigen.

II.2.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit steht außer Zweifel. Die kooperative transdisziplinäre Forschung und technische/wirtschaftliche Umsetzung, eine vielschichtige Vernetzung, und auch projektbezogene Lehre, Bildung und Öffentlichkeitsarbeit wurden intensiviert.

Konstruktive Interaktionen mit den Projektpartnern und darüber hinaus beschleunigen Rückkopplungen und Einfluss von Know-how in innovative Produkte und Verfahren. Mit der Innovationskraft wachsen Wettbewerbsfähigkeit und damit das Potenzial für die Schaffung neuer Arbeitsplätze am Industriestandort Deutschland.

II.3. Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Entfällt.

II.4. Veröffentlichungen

II.4.1. Wissenschaftliche Publikationen

2007

Creton C. and Gorb S. (2007) Sticky feet: from animals to materials. *MRS Bulletin* **32**: 466-472.

Daltorio K.A., Gorb S., Peressadko A., Horchler A.D., Wei T.E., Ritzmann R.E. and Quinn R.D. (2007) Microstructured polymer adhesive feet for climbing robots. *MRS Bulletin* **32**: 504-508.

Gladun D. and Gorb S.N. (2007) Insect walking techniques on thin stems. *Arthropod-Plant Interactions*. 1(2): 77-91

Gorb S.N. (2007) Visualisation of native surfaces by two-step molding. *Microscopy Today*. March 2007, pp. 44-46.

Gorb S.N. (2007) Biological contact systems with enhanced adhesion: What can we learn from evolution? *Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference IJTC2007 October 22-24, 2007, San Diego, California, USA*, IJTC2007- 44380, 3 pp.

Gorb S.N., Sinha M., Peressadko A., Daltorio K.A. and Quinn R.D. (2007) Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. *Bioinspiration and Biomimetics*. **2**: 117–125.

Gorb S. and Varenberg M. (2007) Mushroom-shaped geometry of contact elements in biological adhesive systems. *J. Adhesion Sci. Technol.* **21**: 1175–1183.

Varenberg M. and Gorb S. (2007) Shearing of fibrillar adhesive microstructure: friction and shear-related changes in pull-off force. *J. R. Soc. Interface* **4**: 721–725.

Varenberg M. and Gorb S. (2007) A beetle-inspired solution for underwater adhesion. *J. R. Soc. Interface*, doi:10.1098/rsif.2007.1171.

Varenberg M. and Gorb S. (2007) Adhesion and friction of a biomimetic mushroom-shaped fibrillar microstructure. *Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference IJTC2007 October 22-24, 2007, San Diego, California, USA*, IJTC2007-44193, 2 pp.

2008

Daltorio, K. A.; Wei, T. E.; Horchler, A. D.; Southard, L.; Wile, G. D.; Quinn, R. D.; Gorb, S. N.; Ritzmann, R. E. (2008) Mini-Wegs™ climbs steep surfaces using insect-inspired attachment mechanisms. *Int. J. Robot. Res.*, in press.

Daltorio, K.A.; Witushynsky, T.C.; Wile, G.D.; Palmer, L.R.; Malek, A.A.; Ahmad, M.R.; Southard, L.; Gorb, S.N.; Ritzmann, R.E.; Quinn, R.D. (2008) A body joint improves vertical to horizontal transitions of a wall-climbing robot. *ICRA 2008: IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 19-23 May 2008, Pages: 3046 – 3051. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543673

Eimüller, T.; Guttman, P.; Gorb, S. N. (2008) Terminal contact elements of insect attachment devices studied by transmission X-ray microscopy. *J. Exp. Biol.* 211:1958-1963.

Frantsevich, L.; Ji, Aihong; Dai, Z.; Wang, J.; Frantsevich, L.; Gorb, S. N. (2008) Adhesive properties of the arolium of a lantern-fly, *Lycorma delicatula* (Auchenorrhyncha, Fulgoroidea). *J. Insect Physiol.* **54**: 818-827.

Gorb, S. N. (2008) Biological attachment devices: exploring nature's diversity for biomimetics. *Phil. Trans. R. Soc. A* **366**: 1557-1574.

Gorb, S. N. (2008) Smooth attachment devices in insects: functional morphology and biomechanics. *Adv. Ins. Physiol.* **34**: 81-115.

Gorb, S. N.; Voigt, D. (2008): Oberflächenbionik. In: Stiftung Brandenburger Tor (ed.) Prototypen. Bionik und der Blick auf die Natur. Ausstellungskatalog, Berlin: 39-40.

Gorb, S.; Voigt, D.; Peisker, H. (2008) Insect epicuticular grease visualised by scanning probe microscopy. *Microscopy Today* **16**(3): 42-45.

Perez Goodwyn, P.; De Souza, E.; Fujisaki, K.; Gorb, S. N. (2008) Moulding technique demonstrates the contribution of surface geometry to the super-hydrophobic properties of the surface of a water strider. *Acta Biomater.* **4**:766-770.

Varenberg, M.; Gorb, S. (2008) Close-up of mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure: contact element behaviour. Proc. 9th Biennial ASME Conference Engin. Syst. Des. Anal., ESDA2008-59095.

Voigt D., Peisker H., Gorb S. (2008). Visualization of epicuticular grease on the covering wings in the colorado potato beetle: A Scanning Probe Approach. In: B. Bhushan and H. Fuchs (eds.) Applied Scanning Probe Methods XIII. Biomimetics and Industrial Applications. Heidelberg, Springer-Verlag: 1-16.

Voigt, D.; Gorb, S. (2008): An insect trap as habitat: cohesion-failure mechanism prevents adhesion of *Pameridea roridulae* bugs to the sticky surface of the plant *Roridula gorgonias*. J. Exp. Biol. 211: 2647-2657.

Voigt, D.; Schuppert, J. M.; Dattinger, S.; Gorb, S. N. (2008) Sexual dimorphism in the attachment ability of the colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera, Chrysomelidae). J. Insect Physiol. 54: 765-776.

Voigt, D.; Schuppert, J.; Dattinger, S.; Gorb, S. N. (2008): Sexualdimorphismus der Haftfähigkeit an rauen Oberflächen bei *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera, Chrysomelidae). Mitt. Dtsch. Ges. Allg. Angew. Ent., 16: 431-434.

Wile, G.D.; Daltorio, K.A.; Diller, E.D.; Palmer, L.R.; Gorb, S.N.; Ritzmann, R.E.; Quinn, R.D. (2008) Conference on Intelligent Robots and Systems 22-26 Screenbot: Walking inverted using distributed inward gripping. IROS 2008: IEEE/RSJ International Sept. 2008, Pages: 1513 – 1518. DOI: 10.1109/IROS.2008.4651045

Wile, G.D.; Daltorio, K.A.; Palmer, L.R.; Witushynsky, T.C.; Southard, L.; Ahmad, M.R.; Malek, A.A.; Gorb, S.N.; Boxerbaum, A.S.; Ritzmann, R.E.; Quinn, R.D. (2008). Making orthogonal transitions with climbing mini-whlegs™. ICRA 2008: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 19-23 May 2008, Pages:1775 – 1776. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543461

2009

Al Bitar, L; Voigt, D; Zebitz, CPW; Gorb, SN (2009) Tarsal morphology and attachment ability of the codling moth *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) to smooth surfaces. J. Insect Physiol., 55 (11): 1029-1038. 10.1016/j.jinsphys.2009.07.008

Dai, Z; Gorb, S (2009) Contact mechanics of pad of grasshopper (Insecta: ORTHOPTERA) by finite element methods. Chinese Science Bulletin, 54 (4): 549-555. doi: 10.1007/s11434-009-0088-4

Daltorio, K. A., Wei, T. E., Horchler, A. D., Southard, L., Wile, G. D., Quinn, R. D., Gorb, S. N., Ritzmann, R. E. (2009) Mini-Whlegs™ climbs steep surfaces using insect inspired attachment mechanisms. The International Journal of Robotics Research, Februar 2009, 285-302.

Dean, MN; Mull, CG; Gorb, SN; Summers, AP (2009) Ontogeny of the tessellated skeleton: insight from the skeletal growth of the round stingray *Urobatis halleri*. J. Anatomy, 215 (3): 227-239. 10.1111/j.1469-7580.2009.01116.x

Eberhard, MJB; Pass, G; Picker, MD; Beutel, R; Predel, R; Gorb, SN (2009) Structure and Function of the Arolium of Mantophasmatodea (Insecta). J. Morphology, 270 (10): 1247-1261. 10.1002/jmor.10754

Gorb, EV; Gorb SN (2009) Contact Mechanics at the Insect-Plant Interface: How Do Insects Stick and How Do Plants Prevent This? In Borodich F (ed.) Proceedings of the IUTAM Symposium on Scaling in Solid Mechanics, Cardiff, UK, 25–29 June, 2007, Springer Verlag, 243-252.

Gorb, SN; Niederegger, S; Hayashi, CY; Summers, AP; Votsch, W; Walther, P (2009) Silk production from tarantula feet questioned reply. Nature, 461 (7267): E9-E10.

Verheggen, F. J., Capella, Q.; Schwartzberg, E. G.; Voigt, D.; Haubruge, E. (2009) Tomato-aphid-hoverfly: A tritrophic interaction incompatible for pest management. Arthropod Plant Interactions, 3: 141-149. DOI 10.1007/s11829-009-9065-8.

Voigt, D; Gorb, E; Gorb, S (2009) Hierarchical organisation of the trap in the protocarnivorous plant *Roridula gorgonias* (Roridulaceae). J. Exp. Biol., 212 (19): 3184-3191. 10.1242/jeb.034280

Herausgegebene Bücher:

Gorb, SN, ed. (2009) Functional Surfaces in Biology. Volume 1: Little structures with big effects,

Springer Verlag, 390 pp.

Gorb, SN, ed. (2009) Functional Surfaces in Biology. Volume 2: Adhesion Related Phenomena, Springer Verlag, 270 pp.

II.4.2. Sekundärliteratur (Auswahl)/Öffentlichkeitsarbeit

2007

Film- und Hörfunk Medien

Film:

SWR2 Wissen: "Wunder auf acht Beinen - Spinnentiere inspirieren die Forschung";

Prometheus – Das Wissenschaftsfernsehen für Baden-Württemberg, Themen: „Tierisch gut – Lernen von Gecko und Co.“ und

Phoenix Sendung: „Frauenpower“

Zuarbeiten (Informationen, Texte, Bildmaterial, Poster, Modelle, Exponate):

Sonderausstellung „Füße - Auf den Spuren der Evolution“ im Naturkundemuseum Paderborn Schwerpunkt „Bionik, Zukunfts-Technik lernt von der Natur“ der Dauerausstellung im Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim.

Laborführungen

8 Laborführungen mit den Themenschwerpunkten „Bioinspirierte Materialforschung“, Fliege, Gecko, Spinne & Co.“ für Schulklassen, Studenten und Teilnehmer MPG-interner Veranstaltungen

2008

Print Medien

Anonym (2008) Allemaal vliegjes. InterConnect, 3/2008: 27-28.

Anonym (2008) Symbiosen: Klebrige Sache. Bild der Wissenschaft 11/2008: 13.

Anonym (2008) Tape suger sig fast som ederkopper. Illustreret Videnskab, 9/2008: 18.

Gorb, S. N.; Voigt, D. (2008) Oberflächenbionik. In: Stiftung Brandenburger Tor (ed.) Prototypen. Bionik und der Blick auf die Natur. Ausstellungskatalog, Berlin: 39-40.

Gormsen, A. J. (2008) Insektfødder inspirerer forskere til ny slags tape. <http://ing.dk/artikel/84624?highlight=stanislav+gorb>.

Guillot, A.; Meyer, J.-A. (2008) Comment mieux adhère. In: La bionique. Quand la science imite la nature. Dunod, ...

Kalinke, M. (2008) Haarspalter. RPS Wissen.

Latusseck, R. (2008) Fressen wo andere sterben. Die Welt, 11.08.2008.

Läubli, M. (2008) Pflanze fangt für Wanze. Züricher Tagesanzeiger, 14.8.2008: 26.

Michael Varenberg and Stanislav Gorb (2008) What beetles can teach us about adhesion. BioInspired! Vol. 6 (3): 6-7.

Mild, M. (2008) Wanze auf der Pflanze als Forschungsobjekt. Südwestumschau, 10.11.2008.

Wandtner, R. (2008) Wanze in schlüpfrigem Kleid. FAZ, Nr. 188 (13.8.2008): 2.

Weitlaner, W. (2008) Anti-Haft-Wanze trotz klebriger Pflanze Natur liefert Vorbild für Haft- und Antihafschichten. www.presetext.at

Film- und Hörfunk Medien

Film:

SWR Fernsehen: „Total phänomenal“ (29.05.2008)

Bionik im Discovery Channel, USA

3Sat/SWR nano „Antihafwanzen“ (9.10.2008)

Prometheus Wissenschaftssender Baden-Württemberg Nachrichten, Anti-Haft-Wanzen (9.09.2009)

Hörfunk:

Deutschlandradio, Meldungen: „Wanze überlistet Pflanze mit klebrigem Schleim“ (11.08.2008)

SWR4 Baden-Württemberg Radio Stuttgart, Serie Forscher in Baden-Württemberg: „Vorbild Weichwanze – Forscher entdecken Anti-Haft-Schicht bei Insekt“ (10.11.2008)

Zuarbeiten (Informationen, Texte, Bildmaterial, Poster, Modelle, Exponate):

Ausstellung „Wissenschaftszug“ der MPG,

Bionikbuch-Projekt, Bertelsmann Verlag,

Zuarbeit von Material und Informationen zu Nano-Sonderausstellung im Landesmuseum für Technik in Mannheim

Ausstellung „Prototypen“, Stiftung Brandenburger Tor, Berlin und

Bionikbuch-Projekt, Bertelsmann Verlag u. a. diverse Schulbücher

Laborführungen

5 mit Themenschwerpunkten „Bioinspirierte Materialforschung“, Fliege, Gecko, Spinne & Co.“ für Schulklassen, Studenten und Teilnehmer MPG-interner Veranstaltungen

2009

Print Medien

Strassmann, B. (2009) Kleben wie der Gecko – Komplexe Sachtexte verstehen. Duo Deutsch A9. Sprach- und Lesebuch. Oldenburg, bsv, Cornelsen Verlag, Portenhauser. 220-223.

Film- und Hörfunk Medien

Film:

Sat1-Sendung Planetopia „Genialer Gecko-Effekt – Warum manche Tiere senkrecht die Wand hochlaufen“ (8.11.2009)

Zuarbeiten (Informationen, Texte, Bildmaterial, Poster, Modelle, Exponate):

Material und Informationen zu Nano-Sonderausstellung im Landesmuseum für Arbeit und Technik in Mannheim; Artikelbeitrag für den Ausstellungsführer

Material und Texte zur Ausstellung Science Express der MPG

II.4.3. Teilnahme an Konferenzen und anderen Veranstaltungen

II.4.3.1. Konferenzen

2007

STLE/ASME International Joint Tribology Conference IJTC2007 October 22-24, 2007, San Diego, California, USA (2 Vorträge)

Bioinspired nanotechnologies for smarter products, London, UK. (Vortrag)

30th Annual Meeting of the Adhesion Society Inc., Tampa, Florida (Vortrag)

Entomologentagung 2007, Innsbruck, Österreich (Vortrag)

Annual main meeting of the Society for Experimental Biology (SEB), Glasgow, UK (2 Vorträge, 2 Poster)

5th Worldwide Dragonfly Association International Congress of Odonatology, Swakopmund, Namibia (Eröffnungsvortrag)

2008

- Bionik-Wirtschaftsforum, 8.-9. April 2008, Osnabrück (Vortrag)
- Denkendorfer Bionik-Kolloquium „Bio-inspired textile materials), ITV Denkendorf (Vortrag)
- Bionik Symposium, Stiftung Brandenburger Tor (Vortrag & Teilnahme bei der Ausstellung)
- Cimtec 2008, 3rd International Conference Smart Materials, Structures and Systems, Acireale, Sicily, Italy, June 8-13, 2008 (2 Vorträge und Programmkomitee/Sektionsorganisation)
- 10th Annual meeting of the Gesellschaft für Biologische Systematik and the 18th International Symposium “Biodiversity and Evolutionary Biology” of the German Botanical Society, Göttingen, Germany (Vortrag)
- 27th Jahrestagung der Gesellschaft deutschsprachiger Odonatologen (GdO e.V.), Potsdam, March 7-9, 2008 (Vortrag)
- Adhesion Conference. March 25-28, 2008, Sevilla, Spanien (2 Vorträge)
- Symposium on Biomaterials Processing. Januar 21-25, 2008, Nagoya, Japan. (Vortrag)
- AIF Forum Industrielle Gemeinschaftsforschung für den Mittelstand, Dresden, 26.06.2008 (Vortrag)
- 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA08, 7th-9th July 2008, Haifa, Israel (3 Vorträge)
- Alpsbacher Technologieforum, Alpbach, Österreich, 21-23.08.2008 (Vortrag).
- Fachtagung „Bionik – an der Schnittstelle zwischen Biologie und Technik“, 24.-25.09.2008, Wien, Austria (Vortrag)
- IROS/IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept. 22-26, 2008 (Vortrag)
56. Deutsche Pflanzenschutztagung, 22.-25.10.2008, Kiel, Germany (Videobeitrag)
- Bionik-Kongress, 7.-8.11.2008, Bremen (1 Vortrag, 4 Poster)
- BIONA Statusseminar, Bonn 27.-28.11.2008 (2 Vorträge)

2009

- XVII National Congress of the Italian Society of Mechanics and Applied Theory, September 14-17, 2009, Ancona, Italy (Vortrag)
- Micro-Tribology '09. September 20-24, 2009 , Milowka, Poland (Warsaw University of Technology, Institute of Micromechanics and Photonics) (2 Vorträge)
- German-Russian Workshop “Contact Mechanics and Friction”, October 5-8, 2009, Berlin (Vortrag)
- Joint ICTP/FANAS Conference Trends in Nanotribology, 19-24 October 2009, ICTP Trieste, Italy (Vortrag, Poster)
- 6th Plant Biomechanics Conference in Cayenne, French Guiana (16.-21.11.2009, 3 Vorträge)

II.4.3.2. Eingeladene Vorträge

2007

- Gorb, S. N., Degussa-Workshop “Bionik”
- Voigt, D., Wörlitzer Workshop Funktionelle Schichten „Adhäsion und Oberflächenfunktionalisierung“
- Gorb, S. N., Fakultät Biologie, Universität München
- Gorb, S. N., Fakultät für Technik, FH Pforzheim
- Gorb, S. N., Workshop HILTI Corporation, Materials & Mechanics, New Business & Technology (Schaan, Liechtenstein) an der Universität Freiburg
- Gorb, S. N., Workshop BioEngineering, BitZ Darmstadt
- Gorb, S. N., Explore Science, Naturwissenschaftliche Erlebnistage Mannheim

2008

- Gorb, S. N. (Januar 2008) Universität Stuttgart (Bionik-Vorlesung)
- Gorb, S. N. (Januar 2008) European Space Agency, Niederlande (Bionikvortrag)

- Gorb, S. N. (März 2008) FH Pfillach, Kärnten, Österreich (Bionikvortrag)
- Gorb, S. N. (April 2008) CRTD, Zentrum für regenerative Therapien, Dresden (Vortrag)
- Gorb, S. N. (Juni 2008) FH Pforzheim (Bionikvortrag)
- Gorb, S. N. (Juni 2008) AIF Funktionelle Oberflächen, Dresden (Vortrag)
- Voigt, D. „Funktionelle biologische Oberflächen und Biomimetik“ im Rahmen der Ringvorlesung Bionik, Universität Stuttgart (Vortrag)
- Gorb, E. Scientific Seminar, Botany Department, Biological Faculty, National University of Kiev, Kiev, Ukraine (Vortrag)

2009

- Voigt, D., Experimentalvortrag im Rahmen der Ringvorlesung Bionik an der FH Pforzheim
- Gorb, S. N. Naturwissenschaftlicher Verein Schleswig-Holstein GKSS Teltow der
- Gorb, S. N. Helmholtz-Gesellschaft, Schwerpunkt Polymeroberflächen
- Gorb, S. N. Workshop des Graduiertenkolleg der Technischen Universität Dresden
- Gorb, S. N. (29.9.-2.10.2009) Willi-Hennig-Symposium an der Universität Hohenheim, Stuttgart
- Voigt, D. (1.10.2009) International Symposium on Engineering Neo-Biomimetics in Tokyo, Japan
- Voigt, D. (3.10.2009) Satellite Symposium on Biomimetic Surface Engineering in Sapporo, Japan
- Gorb, S. N. (15.10.2009) Darwin reloaded-Evolution Heute. Vortragsreihe zum Darwin-Jahr an der Universität Hohenheim, Stuttgart
- Gorb, S. N. (27.10.2009) Interuniversity Micro Electronics Center (IMEC), Leuven, Belgien
- Gorb, S. N. (3.11.2009) Lübecker Werkstoffmesse, IHK Lübeck
- Gorb, S. N. (26.11.2009) Fa Bühler, Uzwil, Schweiz
- Gorb, S. N. (2-3.12.2009) University of Cardiff, Cardiff, UK
- Gorb, S. N. (5.12.2009) Saturday Morning Physics, Veranstaltung für Schulklassen, Kiel

II.4.3.3. Veranstaltungen (personelle und materielle Beteiligung)

2007

- Girlsday im Max-Planck-Institut für Metallforschung
- Hannovermesse, Beteiligung am BOKON-Gemeinschaftsstand mit den Themenschwerpunkten „1.000.000 Ideengeber: Insekten“ und „Insekten: Innovationen im Verborgenen“
- Informationsstand der MPG auf dem 31. Deutschen Evangelischen Kirchentag, Köln
- Explore Science, naturwissenschaftliche Erlebnistagen Mannheim, Veranstaltung der Klaus Tschira Stiftung Gemeinnützige GmbH Heidelberg und des Landesmuseums Mannheim

2008

- Hannovermesse Industrie 2008, Beteiligung am BOKON-Gemeinschaftsstand mit Themenschwerpunkt „Der Struktur auf der Spur“

2009

- Hannovermesse Industrie 2009, Beteiligung im Rahmen des InspiRat-Projektes