

# 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

<b>I. Kurzdarstellung</b>	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
<b>II. Eingehende Darstellung</b>	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 Haftsysteime.....	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 (makroskopi-sche) 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).