

Eine außergewöhnliche Klebzunge bei Insekten als Vorbild für die Entwicklung biphasischer viskoser Klebstoffe

Zuwendungsempfänger: Max-Planck-Institut für Metallforschung
Zoologisches Institut der Universität Tübingen

Förderkennzeichen: BNK2-052

Laufzeit des Vorhabens: 01. Juli 2006 – 31. März 2007

Berichtszeitraum: 01. Juli 2006 – 31. März 2007

Autoren: Prof. Dr. Oliver Betz¹, PD Dr. Stanislav Gorb² & Dipl.-
Biol. Lars Koerner¹

¹**Zoologisches Institut der Universität Tübingen,**
Abteilung Evolutionsbiologie der Invertebraten,
Auf der Morgenstelle 28E, 72076 Tübingen,
Tel: 07071-29-72995, Fax: 07071-29-4634,
Email: oliver.betz@uni-tuebingen.de

²**Max-Planck-Institut für Metallforschung,**
Heisenbergstr. 3, 70569 Stuttgart,
Tel: 0711-689-3414, Fax: 0711-689-3412
Email: s.gorb@mf.mpg.de

Inhaltsverzeichnis:

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde
3. Planung und Ablauf des Vorhabens
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

II. Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse
2. Voraussichtlicher Nutzen
3. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen
4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

III. Anlage: Erfolgskontrollbericht

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel der Machbarkeitsstudie war die Erarbeitung biomechanischer Eckdaten für die Verbesserung von Haftsystemen, die unter Vermittlung (biphasischer) viskoser Klebstoffe arbeiten. Diese Daten sollten am Beispiel des Fangapparates bei der Kurzflügelkäfergattung *Stenus* untersucht werden, dessen terminale Haftpolster beim Fangschlag unter Vermittlung eines (biphasischen) Haftsekretes auf das Beuteobjekt angepresst werden.

Im Rahmen dieser Studie sollten folgende Detailsaspekte untersucht werden:

- (i) die Haftwirkung der Klebpolster an verschiedenen physikalisch definierten synthetischen und natürlichen Oberflächen
- (ii) der Einfluss der Struktur der Klebpolster (Anzahl und Dichte der Haftkontakte, Haftpolsterfläche) auf die erzielbaren Klebkräfte
- (iii) die kryo-rasterelektronenmikroskopische Visualisierung der Haftpolster und des ihnen aufliegenden Haftsekretes
- (iv) die strukturelle und chemische Analyse des Haftsekretes selber

Die gewonnenen Ergebnisse verbessern unser Verständnis darüber, welche Kombination aus strukturellen, chemischen und physikochemischen Eigenschaften für die exzellente Haft-Performanz dieses biologischen Systems verantwortlich ist. Diese Erkenntnisse sollen helfen, neue Ideen für die Herstellung von Klebstoffen zu entwickeln, die in Verbindung mit hierarchisch terminal verzweigten (Mikro-)Strukturen eingesetzt werden können.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde am Zoologischen Institut der Universität Tübingen, Abteilung Evolutionsbiologie der Invertebraten und am Max-Planck-Institut für Metallforschung, Abteilung Arzt, Stuttgart, durchgeführt.

Die Projektleitung oblag Prof. Dr. Oliver Betz, Zoologisches Institut der Universität Tübingen, Abteilung Evolutionsbiologie der Invertebraten.

Personal: Die Machbarkeitsstudie wurde in Kooperation mit PD Dr. Stanislav Gorb vom Max-Planck-Institut für Metallforschung (Biomaterials Group) durchgeführt. Die wissenschaftlichen Arbeiten an der Universität Tübingen in der Abteilung Evolutionsbiologie der Invertebraten wurden vom Dipl.-Biol. Lars Koerner durchgeführt (Vergütungsgruppe IIa BAT).

Die GC/MS-Analysen sowie erste Proteinanalysen wurden von Prof. Dr. Konrad Dettner sowie Dipl.-Biol. Inka Lusebrink an der Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Tierökologie durchgeführt.

Auch wenn nicht durch die BMBF-Förderung finanziert, danken die Autoren für die Assistenz bei der Versuchsdurchführung und wertvolle Diskussionen: Conny Miksch, MPI für Metallforschung, Dr. Heinz Schwarz, MPI für Entwicklungsbiologie, Dr. York-Dieter Stierhof, Dr. Graeme Nicholson, Dr. Klaus Eisler, Julia Straube, Karl-Heinz Hellmer und Maria Isabel Koerner, alle Universität Tübingen sowie Dr. Helmut Schäfer, Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung Bremen.

Die Laufzeit der Machbarkeitsstudie betrug neun Monate vom 01. Juli 2006 bis zum 31. März 2007.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Mit mikroskopischen, chemisch-analytischen sowie biomechanischen Methoden wurden die Grundprinzipien herausgearbeitet, die der Funktionalität dieses einzigartigen Fangapparates zugrunde liegen. Hierbei interessierten uns vor allem Eigenschaften, welche die (i) Dimension und Dichte von Haftelementen, (ii) die chemische Zusammensetzung und physikalische Struktur (biphasischer) Haftsekrete sowie (iii) die physikalischen Wirkmechanismen betreffen.

Die beim Klebfang auftretenden Haftkräfte konnten mittels eines von uns entwickelten Versuchsaufbaues erstmalig *in vivo* bestimmt werden. Diese Kraftmessungen wurden bis jetzt bei 10 Arten der Gattung *Stenus* durchgeführt. Des Weiteren wurde die Haftleistung der Klebzung auf standardisierten Oberflächen mit unterschiedlichen Rauigkeiten und Oberflächenenergien getestet. Die Bewegungsabläufe während dieser Fangschläge wurden gleichzeitig mit einer auf einem Binokularmikroskop montierten Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet.

Mit dem Verfahren der Kryo-Rasterelektronenmikroskopie war es möglich, die Größe und Form der Haftpolster sowie die Verteilung des Haftsekretes über den Hafttrichomen darzustellen. Die Schichtdicke des Haftsekretes wurde mittels Weisslichtinterferometrie bestimmt. Ultrastrukturelle, chemische und physikochemische Studien erbrachten erste Hinweise auf die Zusammensetzung und Verteilung der chemischen Komponenten des Haftsekretes.

Die Übertragbarkeit der entdeckten Prinzipien auf synthetische Systeme sollte getestet werden.

Die zeitliche Planung wurde in der Vorhabensbeschreibung des Förderantrags detailliert dargestellt. Der Ablauf des Vorhabens entsprach der Planung.

Die Gesamtkosten des Projektes betrugen, wie im Finanzierungsplan vorgesehen, 50 000 € (30 000 € Universität Tübingen, 20 000 € MPI Stuttgart).

Die Finanzberichte (Verwendungsnachweise) wurden separat angefertigt und dem Projektträger übersandt.

Ein Kurzbericht, der alle wesentlichen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie enthält, wurde im Mai 2007 beim Projektträger eingereicht. Alle aus dieser Machbarkeitsstudie resultierenden Publikationen werden nach Veröffentlichung ebenfalls eingereicht.

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

Die Thematik der Haftsysteme ist in jüngster Zeit dank der Einführung neuer experimenteller und mikroskopischer Techniken wieder verstärkt aufgegriffen worden (z.B. Attygalle et al. 2000, Federle et al. 2000, Jiao et al. 2000, Scherge & Gorb 2001). Dabei wurden sehr unterschiedliche Aspekte wie die generelle Morphologie, die chemische Beschaffenheit der Haftsekrete, die Adhäsionsleistung von Haftstrukturen sowie die den Haftvorgängen zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen untersucht. Generell existieren bei Insekten zwei verschiedene Haftsysteme; entweder solche mit glatten oder solche mit behaarten Oberflächen (Beutel & Gorb, 2001). Beide Systeme zeichnen sich durch ihre enorme Flexibilität aus, sodass die Kontaktfläche zum Substrat unabhängig von dessen Rauigkeit maximiert werden kann. In beiden Systemen sind die erzielten Haftkräfte abhängig von verschiedenen morphologischen Parametern (z.B. Anzahl, Fläche und Dichte der Haftelemente) (Gorb 2001, Gorb et al. 2001, Arzt et al. 2003). Die den verschiedenen Haftsystemen zugrunde liegenden Mechanismen können von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein und werden in unterschiedlichem Ausmaß von van der Waals-, Kapillar-, Viskositäts- und Reibungskräften generiert (z.B. Israelachvili 1991, Scherge & Gorb 2001).

Adhäsionsvorgänge bei Insekten wurden in der Vergangenheit in erster Linie im Kontext von Lokomotionsvorgängen untersucht. Ein wenig beachteter Aspekt, bei dem Haftstrukturen eine Rolle spielen, ist der Beutefang (Betz & Kölsch 2004). Dabei muss die Haftstruktur eine extrem rasche Verbindung eingehen können, damit die Fluchtbewegungen der Beute unwirksam bleiben.

In unserer Machbarkeitsstudie beschäftigten wir uns mit der Klebzunge der Vertreter der Kurzflügelkäfergattung *Stenus*. Die Vertreter dieser Gruppe zeichnen sich durch eine vorschnellbare, stabförmig verlängerte Unterlippe (Labium) aus, mit dem sie selbst ausgesprochen fluchtfähige Beutetiere sehr effektiv erbeuten können (Betz 1996). Die grundsätzliche Struktur und Funktion dieses Fangapparates wurde im Verlauf mehrerer Studien geklärt (z.B. Schmitz 1943, Weinreich 1968, Betz 1996, 1998, Kölsch & Betz 1998, Kölsch 2000).

An der Haftwirkung der Klebzunge ist ein Sekret beteiligt, welches vor dem Fangakt über die Oberfläche der Hafthaare verteilt wird. Die Wirkung dieses Haftsekretes beruht vermutlich auf dem Mechanismus der Viskosität. Ultrastrukturelle Untersuchungen legten nahe, dass es sich bei dem Sekret um ein disperses System handelt, bei dem Lipidtröpfchen in einer mächtigeren proteinhaltigen Fraktion emulgiert vorliegen (Kölsch 2000, Betz & Kölsch 2004). Emulsionen sind sogenannte metastabile Kolloide aus zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten (eine polare und eine weniger polare), wobei die eine Phase in der anderen dispergiert vorliegt. Hierbei fungieren oberflächenaktive Emulgatoren in der Regel als Stabilisatoren, indem sie die Energie der Phasengrenzen senken und dadurch einer Entmischung beider Phasen entgegenwirken. Als stabilisierende Emulgatoren könnten hierbei ebenfalls im Tarsalsekret von Insekten nachgewiesene Komponenten wie zum Beispiel Cholesterol, freie Fettsäuren oder Saccharide fungieren (Vötsch et al. 2002). Der Vorteil solcher Emulsionen könnte zum einen in verbesserten Benetzungseigenschaften gegenüber verschiedenen Substraten liegen, da sie sich sowohl mit hydrophilen als auch hydrophoben Oberflächen verbinden können. Zum anderen ließe sich darüber auch die Viskosität des Haftsekretes und damit seine Haftwirkung erhöhen.

Für Emulsionen finden sich eine Vielzahl technischer Anwendungen, angefangen bei der Lösung und dem Transport hydrophober Substanzen in einer wässrigen Phase (ohne die Notwendigkeit der Anwendung organischer Lösungsmittel) bis hin zu verschiedenen Oberflächenbehandlungen wie Farbanstrichen oder Schmiermitteln (Bibette et al. 1999). Auch im Bereich der Klebetechnik können Emulsionen von großer Bedeutung sein, zum Beispiel in Form der so genannten Dispersionsklebstoffe, bei denen Monomere in einer Wasserphase dispergiert vorliegen, um nach Applikation auf den zu verklebenden Bauteilen unter Verlust der Wasserphase zu polymerisieren (Lagaly et al. 1997).

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die chemischen Analysen (GC/MS, Proteine) wurden in Kooperation mit Prof. Konrad Dettner (Universität Bayreuth) durchgeführt, die Kryofixierung der Klebpolster von Dr. Heinz Schwarz und Dr. York-Dieter Stierhof am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie.

Alle anderen Untersuchungen (Mikrotomie, REM, Kryo-REM, TEM, Kraftmessungen, Weisslichtinterferometrie, Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, Schrägbedampfung) konnten unabhängig von diesen Kooperationen an der Universität Tübingen und am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart durchgeführt werden.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Erzielte Ergebnisse

Die Klebung der Vertreter der Kurzflügelkäfergattung *Stenus* stellt ein einzigartiges Beispiel biologischer Haftsysteme dar. Dabei wird die Haftwirkung dieses Kleborgans durch ein Sekret gewährleistet, welches in speziellen Kopfdrüsen produziert und über die Haftpolster verteilt wird. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde in den neun Monaten von Juli 2006 bis Ende März 2007 untersucht, welche Klebkräfte aus diesem biologischen System resultieren und welche strukturellen, chemischen und physikochemischen Eigenschaften für die exzellente Haftperformance verantwortlich sind. Unsere Ergebnisse zeigen das hohe bionische Potenzial hierarchisch organisierter, sekretvermittelter, biologischer Haftsysteme.

Die Struktur der Haftpolster und des ihnen aufliegenden Klebsekretes wurde mit Methoden der Kryo-Raster- sowie Transmissions-Elektronenmikroskopie untersucht. Dabei zeigte sich, dass die abgegebene Sekretmenge relativ groß ist, sodass die Hafthaare fast vollständig mit Sekret bedeckt sind und nur deren terminale Verzweigungen aus dem Sekret ragen (Abb. 1).

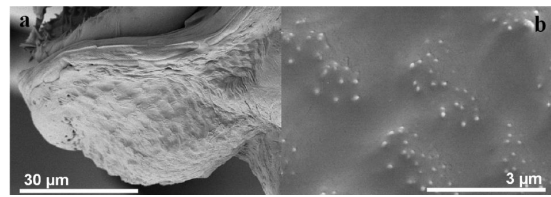


Abb. 1: Kryo-Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Klebpolster (von lateral) mit aufliegendem Klebsekret. (a) Die Hafthaare sind vollständig mit dem Klebsekret benetzt, während die lateralen Flankenhäute unbenetzt bleiben. (b) Lediglich die terminalen Verzweigungen der Hafthaare ragen aus dem Klebsekret heraus.

Durch den von uns entwickelten Versuchsaufbau war es erstmals möglich, die während des Fangschlages auftretenden Kräfte zu bestimmen. Dabei zeigten sich interessante Korrelationen zwischen den Adhäsionskräften und verschiedenen morphologischen Parametern der Klebpolster (Fläche der Klebpolster, Anzahl der Hafthaare und Haftkontakte pro Klebpolster) verschiedener *Stenus*-Arten (Abb. 2). Außerdem konnte gezeigt werden, dass sich die Haftleistung der Klebpolster selbst auf sehr rauen Oberflächen nicht ändert. Diese Beobachtung weist darauf hin, dass es sich bei dem Klebsekret dieser Käfer um einen echten Klebstoff handelt, da auch bei diesen die Haftwirkung auf rauen Oberflächen nicht vermindert ist. Da das Haftsekret wahrscheinlich eine Emulsion aus hydrophilen und hydrophoben Komponenten darstellt, unterscheidet sich die Haftkraft auf Oberflächen mit unterschiedlichen Oberflächenenergien nur unwesentlich voneinander. Das Sekret haftet selbst auf relativ feuchten, weichen Materialien (z.B. Muskel- und Fettgewebe). Diese Eigenschaft könnte für die Medizinklebertechnik von Interesse sein.

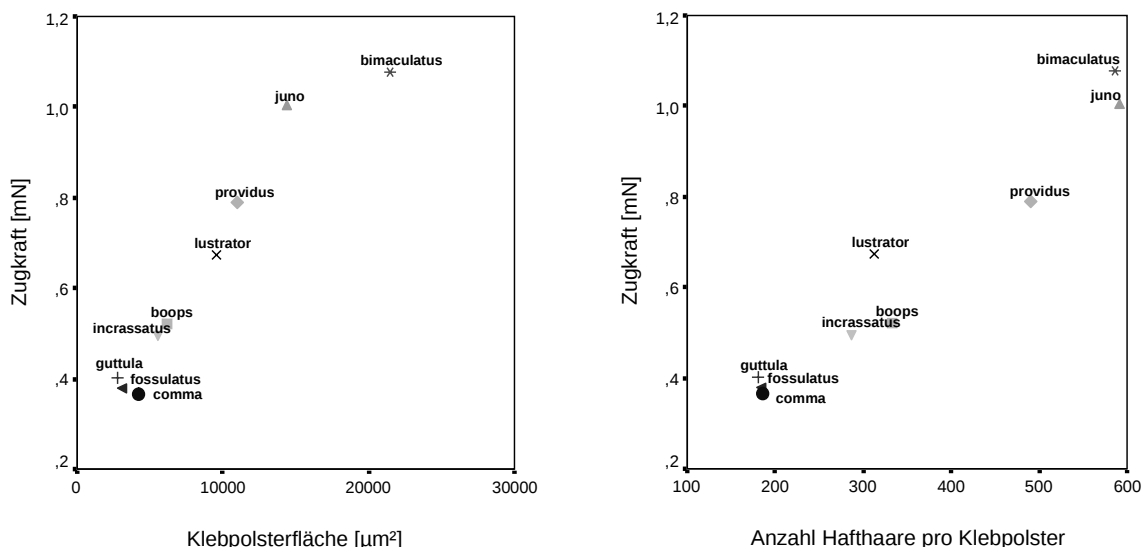


Abb. 2: Abhängigkeit der Adhäsionskräfte [mN] von der Morphologie der Klebpolster. Die Adhäsionskräfte sind positiv mit der Fläche der Klebpolster (a) sowie der Anzahl der Hafthaare auf dieser Fläche (b) korreliert.

Histochemische Analysen des Sekretes legen nahe, dass seine hohe Viskosität auf einer Kombination aus wasserlöslichen (Mucopolysaccharide, Proteine) und fettlöslichen (Lipide) Komponenten beruht. Sämtliche in der Natur vorkommenden Haftsekrete basieren auf proteinösen sowie zuckerhaltigen Komponenten (vgl. Scherge & Gorb 2001). Aufgrund der extrem geringen Menge des gewinnbaren Klebsekrets ($< 1 \mu\text{g}$) sollen in den folgenden Monaten neue, sensitivere, mikroanalytische Verfahren angewandt werden, um die genaue chemische Zusammensetzung des Sekretes zu bestimmen.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse ist in einem vertraulichen Ergebnis-Zwischenbericht an den Projektträger dokumentiert. Publikationen in hochrangigen Zeitschriften sind in Arbeit, in denen die Ergebnisse einem breiten Publikum aus Wissenschaft und Technik bekannt gemacht werden sollen.

II.2 Voraussichtlicher Nutzen

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie konnte gezeigt werden, dass der Fangapparat der Gattung *Stenus* mit seiner Mikrostrukturierung, dem Haftsekret und den daraus hohen resultierenden Haftkräften Anregungen für die Entwicklung neuer (proteinbasierter) Klebstoffe und mikrostrukturierter Oberflächen geben kann. Vorteile natürlicher Klebstoffe sind deren Umweltfreundlichkeit (Herstellung ohne Zuhilfenahme organischer Lösungsmittel und Schwermetallkatalysatoren), die biologische Abbaubarkeit, deren gezielte enzymatische Lösbarkeit sowie deren bessere physiologische Verträglichkeit (Brockmann et al. 2005). Potentielle Anwendungsbereiche sind die Verpackungsindustrie, die Bauindustrie (z.B. Kleben von Bodenbelegen) und der Medizinbereich (Gewebechirurgie, Zahnmedizin, Prothetik) (Nachtigall 2002).

Im Bereich der Klebtechnik gibt es eine Reihe ungelöster Fragestellungen wie zum Beispiel das Kleben unter bzw. in Anwesenheit von Wasser, der Einsatz von Klebstoffen in der Medizin (die lebende Gewebe kleben und zudem biokompatibel sind) sowie reversibel lösbare Klebeverbindungen. In der Natur existieren Organismen, die derartige Klebeverbindungen nutzen (vgl. Scherge & Gorb 2001). So könnten die Eigenschaften dieser Klebemechanismen auch auf technische Systeme übertragen werden. Beispielsweise wird derzeit an Hybridklebstoffen geforscht, die ein "synthetisches Rückgrat" aufweisen (z.B. aus synthetischen Acrylaten) und mit Proteinsegmenten modifiziert werden (d.h. nur Verwendung der Segmente, die klebewirksam sind) (Grunwald & Rischka 2006/2007).

Das von uns untersuchte Haftsyste**m** besitzt die Eigenschaft der Reversibilität, also des schnellen Anheftens und Ablösens. Diese Eigenschaft scheint industriell anwendbar zu sein, da Verbindungstechniken wie Schweißen oder permanentes Kleben kostenintensive Prozesse sind: Einmal auf diese Weise verbundene Bauteile lassen sich bei Reparaturen oder einem späteren Recycling nicht mehr ohne Materialverlust voneinander lösen.

Ein weiterer interessanter Anwendungsaspekt des untersuchten Systems liegt in der feinen (hierarchischen) Strukturierung in nochmals terminal verzweigten Haaren. Diese Mikrostrukturierung kann beim klebstofffreien Haften (wieder ablösbare Verbindungen zwischen Materialien/Oberflächen) Anwendung finden. Geforscht wird dabei an Haftsyste**m**en, die es erlauben, reversible feste Verbindungen von Werkstoffen ohne Schweißen oder Kleben aufzubauen. So haben wir kürzlich im Rahmen anderer Studien ein Klebeband mit starken Adhäsionskräften entwickelt, welches ohne Haftflüssigkeit funktioniert (trockene Adhäsion). Diese Klebefolie mit der

pilzähnlichen Mikrostruktur weist verbesserte Abziehkräfte pro Einheit Kontaktfläche auf und ist weniger anfällig für Verschmutzungen (Gorb et al. 2007). Nach Verschmutzung kann es mit Seifenwasser gewaschen werden und gewinnt dadurch die ursprünglichen Hafteigenschaften wieder zurück. Die Effizienz dieses Klebebandes könnte durch die Applikation einer zusätzlichen Flüssigkeitsschicht (Klebstoffschicht) nach dem Vorbild von Insektenadhäsiven eventuell stark verbessert werden.

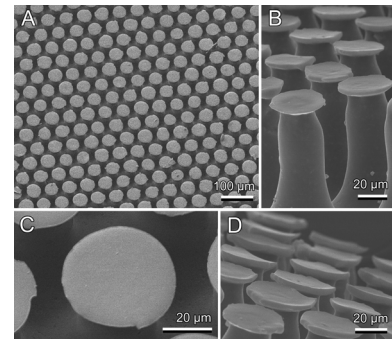


Abb. 3: Mikrostrukturiertes trockenes Klebeband. Aus S. N. Gorb et al. 2007.

II.3 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

An Haftsystemen von Insekten und anderen Tieren arbeiten zurzeit mehrere Forschungsgruppen. Im Juni 2007 erschien eine Zeitschrift mit verschiedenen Themen aus dem Bereich der Adhäsion (MRS Bulletin; Herausgeber Stanislav Gorb und Constantino Creton). Die Artikel beschäftigen sich vor allem mit den Mechanismen und Prinzipien der Adhäsion, aber auch mit der bionischen Anwendung, z.B. der Herstellung mikrostrukturierter Oberflächen. Außerdem wurde ein Klebeband nach dem Vorbild von Muschel und Gecko entwickelt (Lee et al. 2007). Dieses Klebeband enthält nm-große Säulen (Gecko) und eine dünne Schicht eines synthetischen Polymers, das die Adhäsionsproteine von Muschelhaftorganen imitiert. Dabei zeigte sich, dass das Klebeband die adhäsiven Eigenschaften auch nach 1000maligem Ablösen in trockener und nasser Umgebung beibehält. Durch den Einsatz der dünnen Polymerschicht erhöhte sich die Adhäsionskraft um das 15fache. Diese Untersuchungen zeigen, dass die Kombination eines Klebsekrets und einer mikrostrukturierten Oberfläche ein großes bionisches Potential besitzt.

II.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Veröffentlichungen in einschlägigen Fachpublikationen sind in Arbeit. Wissenschaftliche Vorträge zu den Resultaten der Machbarkeitsstudie sind bereits gehalten worden: Universität Tübingen 09.02.2007; Entomologentagung, Innsbruck, 27.02.2007; 22nd International Meeting on Biology and Systematics of Staphylinidae, Stuttgart, 18.05.2007; BMBF, Berlin, 19. Juni 2007; Firma Henkel, Düsseldorf, 03.09.2007.

III. Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Die Machbarkeitsstudie „Bionik — Innovationen aus der Natur“ im Rahmenprogramm „Biotechnologie — Chancen nutzen und gestalten“ sollte die Entwicklung von Ideen aus der interdisziplinären Zusammenarbeit und der Kreativität von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren anstoßen und gleichzeitig zur Netzworkebildung zwischen Universitäten und Forschungseinrichtungen beitragen. In diesem Projekt ist es gelungen, Wissenschaftler aus verschiedenen Fachrichtungen der Biologie, Chemie, Physik und Werkstoffwissenschaften aus verschiedenen Universitäten (Tübingen und Bayreuth) sowie verschiedenen Forschungseinrichtungen (Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart; Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, Tübingen) zu integrieren und erfolgreich mit ihnen zusammenzuarbeiten. Durch diese interdisziplinäre Zusammenarbeit konnte die prinzipielle Machbarkeit des geförderten Vorhabens demonstriert werden. Die Arbeiten sollen nun im Sinne des förderpolitischen Zieles eines Lückenschlusses zwischen reiner Grundlagenforschung und marktnaher Forschung und Entwicklung, in Zusammenarbeit mit Unternehmen (z.B. Henkel) und im Rahmen des geplanten interfakultären Schwerpunktprojektes "Funktionelle mikro- und nanostrukturierte Grenzflächen in Natur und Technik" an der Universität Tübingen fortgesetzt und verwertet werden.

III.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

Für Details der Untersuchungen siehe den vertraulichen Ergebnis-Zwischenbericht für den Ideenwettbewerb „Bionik – Innovationen aus der Natur“ und Abschnitt II.1.

Die Resonanz auf bisherige Präsentationen der Ergebnisse war sehr positiv. Neue wissenschaftliche Kooperationen resultierten ebenso daraus wie die Einladung zur Firma Henkel, deren Mitarbeiter großes Interesse an den präsentierten Ergebnissen zeigten und eventuell eine wissenschaftliche Kooperation anstreben. Des Weiteren entstand an der Universität Tübingen der Schwerpunktbereich "Funktionelle mikro- und nanostrukturierte Grenzflächen in Natur und Technik", in dem - aufbauend auf dieser Machbarkeitsstudie - das Teilprojekt "Struktur und Funktion biologischer Haftsysteme" vorgesehen ist (Abschnitt III.3).

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplanes

Aufgrund der wissenschaftlichen Arbeit an diesem Projekt gelang es uns, trotz der Beendigung der Finanzierung durch das BMBF ein Promotionsstipendium für Herrn Dipl.-Biol. Lars Koerner im Rahmen der Landesgraduiertenförderung Baden-Württemberg zu beantragen, welches die geleisteten Vorarbeiten nun fortsetzen wird. Außerdem soll versucht werden, im Rahmen des Schwerpunktes "Funktionelle mikro- und nanostrukturierte Grenzflächen in Natur und Technik" im Teilbereichprojekt "Struktur und Funktion biologischer Haftsysteme" verstärkt interdisziplinär mit Physikern und Chemikern der Universität Tübingen zusammenzuarbeiten. Im Rahmen dieses Forschungsverbundes "Grenzflächen" ist die Bearbeitung folgender Fragestellungen geplant:

1. Verständnis der strukturellen Prinzipien biologischer Haftsysteme und ihrer Diversität im Kontext ihrer jeweiligen biologischen Rolle (Schwerpunkt Gliedertiere (Arthropoden)).

2. Verständnis der chemischen Zusammensetzung und physiko-chemischen Eigenschaften der beteiligten Haftsekrete (Schwerpunkt Gliedertiere (Arthropoden)).
3. Ermittlung der Performanz biologischer Haftsysteme (Schwerpunkt Gliedertiere (Arthropoden)).
4. Machbarkeitsstudien zur bionischen Umsetzung der gefundenen Haftprinzipien.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Aufgrund der kurzen Laufzeit der Machbarkeitsstudie wurden Untersuchungen ganz gezielt nur mit viel versprechenden und bewährten Methoden durchgeführt. So führten sämtliche Arbeiten zu den in Art und Umfang erhofften Ergebnissen. Unsere ersten Analysen zur Chemie des Haftsekretes mittels GC/MS zeigten aufgrund der geringen Sekretmengen noch große Streuungen, so dass hier in Zukunft mit empfindlicheren Analysemethoden gearbeitet werden muss. Aufgrund der noch fehlenden Daten zur Chemie des Haftsekretes haben wir die geplanten Versuche am mikrostrukturierten Prototyp, dessen Haftfläche in einem dem natürlichen Vorbild nachempfundenen Adhäsiv getränkt wurde, verschoben.

III.5 Präsentationsmöglichkeiten

Vorträge: Universität Tübingen, 09.02.2007; Entomologentagung, Innsbruck, 27.02.2007; 22nd International Meeting on Biology and Systematics of Staphylinidae, Stuttgart, 18.05.2007; BMBF, Berlin, 19. Juni 2007. Weitere Vorträge sind geplant.

Bionik-Ausstellung "Experimentalstation Bionik - Die Intelligenz der Evolution", Berlin, 2008.

III.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Sowohl die Ausgaben- als auch die Zeitplanung des Projektes wurden eingehalten. Alle im Antrag vorgesehenen wissenschaftlichen Bausteine sind nach Plan erarbeitet worden.

Literatur

- Arzt, E., Gorb, S. & Spolenak, R. (2003). From micro to nano contacts in biological attachment devices. *Proceedings of the National Academy of Science* 100 (19): 10603-10606
- Attygalle, A. B., Aneshansley, D. J., Meinwald, J. & Eisner, T. (2000). Defense by foot adhesion in a chrysomelid beetle (*Hemisphaerota cyanea*): characterization of the adhesive oil. *Zoology* 103, 1-6.
- Betz O. (1996). Function and evolution of the adhesion-capture apparatus of *Stenus* species (Coleoptera, Staphylinidae). *Zoomorphology* 116:15-34.
- Betz O. (1998). Comparative studies on the predatory behaviour of *Stenus* spp. (Coleoptera: Staphylinidae): the significance of its specialized labial apparatus. *Journal of Zoology London* 244:527-544.
- Betz, O. & Kölsch, G. (2004). The role of adhesion in prey capture and predator defence in arthropods. *Arthropod Structure & Development* 33: 3-30.
- Beutel, R. G. and Gorb, S. N. (2001). Ultrastructure of attachment specializations of hexapods (Arthropoda): evolutionary patterns inferred from a revised ordinal phylogeny. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* 39: 177-207.
- Bibette, J., Leal-Calderon, F. & Poulin, P. (1999). Emulsions: basic principles. *Rep. Prog. Phys.* 62, 969-1033.
- Brockmann, W., Geiss, P.L., Klingen, J. (2005). *Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*, Wiley VCH, 434 p.
- Federle, W., Rohrseitz, K. & Hölldobler, B. (2000). Attachment forces of ants measured with a centrifuge: better "wax-runners" have a poorer attachment to a smooth surface. *J. Exp. Biol.* 203, 505-512.
- Gorb, S.N. (2001). *Attachment Devices of Insect Cuticle*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gorb, S., Gorb, E. & Kastner, V. (2001). Scale effects on the attachment pads and friction forces in syrphid flies (Diptera, Syrphidae). *Journal of Experimental Biology* 204: 1421-1431.
- Gorb, S. N., Varenberg, M., Peressadko, A. & Tuma, J. (2007). Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure. *J. R. Soc. Interface* 4, 271-275, 2007.
- Israelachvili, J.N. (1991). *Intermolecular and surface forces*, London, Academic Press
- Jiao, Y., Gorb, S. and Scherge, M. (2000). Adhesion measured on the attachment pads of *Tettigonia viridissima* (Orthoptera, Insecta). *J. Exp. Biol.* 203, 1887-1895.
- Kölsch, G. & Betz, O. (1998). Ultrastructure and function of the adhesion-capture apparatus of *Stenus* species (Coleoptera, Staphylinidae). *Zoomorphology* 118: 263-272.
- Kölsch, G. (2000). The ultrastructure of glands and the production and function of the secretion in the adhesive capture apparatus of *Stenus* species (Coleoptera: Staphylinidae). *Canadian Journal of Zoology* 78:465-475.
- Lagaly, G., Schulz, O., Zimehl, R. (1997). *Dispersionen und Emulsionen*, Steinkopff Verlag, Darmstadt.
- Lee, H., Lee, B. P. & Messersmith, P. B. (2007). A reversible wet/dry adhesive inspired by mussels and geckos. *Nature* 448: 338-342.
- Nachtigall, W. (2002). *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer: Berlin.
- Grunwald, I. & Rischka, K. (2006/2007). Annual Report IFAM: 64-67.
- Scherge, M. & Gorb, S.N. (2001). *Biological macro- and nanotribology. Nature's solutions*. Springer: Berlin, Heidelberg.
- Schmitz, G. (1943). Le labium et les structures bucco-pharyngiennes du genre *Stenus* LATREILLE. *Cellule* 49: 291-334.
- Vötsch, W., Nicholson, G., Müller, R., Stierhof, Y.-D., Gorb, S. & Schwarz, U. (2002). Chemical composition of the attachment pad secretion of the locust *Locusta migratoria*, *Insect Biochemistry and Molecular Biology* 32: 1605-1613.
- Weinreich E. (1968). Über den Klebfangapparat der Imagines von *Stenus* LATR. (Coleopt., Staphylinidae) mit einem Beitrag zur Kenntnis der Jugendstadien dieser Gattung. *Zeitschrift für Morphologie und Ökologie der Tiere* 62:162-210.