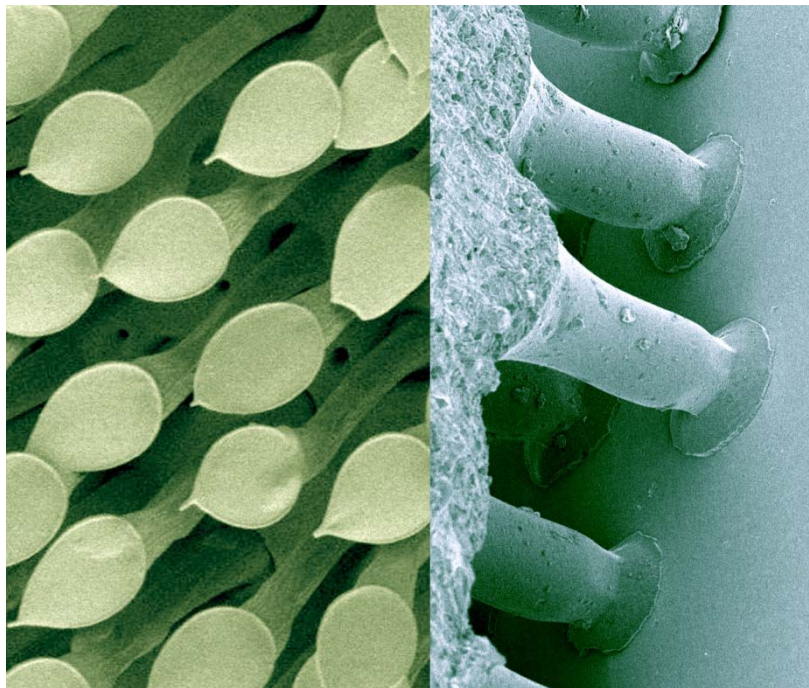


Abschlussbericht

Biologische Inspiration für klebstofffreies Haftmaterial

Förderkennzeichen: 01RB0802A

Projektlaufzeit: 01.10.2008 - 30.09.2012



Projektleitung: **Prof. Dr. Stanislav N. Gorb**
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel ,
Funktionelle Morphologie und Biomechanik

Projektpartner: **Gottlieb Binder GmbH & Co. KG**
Bahnhofstraße 19, 71088 Holzgerlingen

Projektträger: **DLR**

Inhalt

I.	Kurzdarstellung	5
I.1	Aufgabenstellung.....	5
I.2	Voraussetzungen, unter denen das FE-Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	7
I.4.1	Wissensstand in der Biologie	7
I.4.2	Stand der Technik.....	8
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
II.	Eingehende Darstellung.....	10
II.1	Erzieltes Ergebnis	10
II.1.1	Struktur und Funktion der Haftstrukturen verschiedener Tierarten	10
II.1.1.1	Screening biologischer Systeme.....	10
II.1.1.2	Haft- und Reibungseigenschaften der tarsalen Haftstrukturen von zwei Stabheuschreckenarten (Phasmatodea).....	12
II.1.1.3	Muskeleinsatz zur Haltungskontrolle bei Stabheuschrecken	19
II.1.1.4	Einfluss von Feuchtigkeit auf die Haftung der Spinnenart <i>Philodromus dispar</i> (Araneae, Philodromidae)	25
II.1.1.5	Verlust von Flüssigkeit eines Insektenfußes beim Anhaften an das Substrat	29
II.1.1.6	Aktivität des Krallenmuskels bei laufenden Käfern der Art <i>Pachnoda marginata</i> (Coleoptera, Scarabaeidae) auf verschiedenen Oberflächen	44
II.1.2	Andere biologische Haftsysteme.....	51
II.1.2.1.	Adhäsion der Fliegenfänger-Falle	51
II.1.2.2	Haftung der Eier des Apfelwicklers <i>Cydia pomonella</i> L. (Lepidoptera, Tortricidae) auf unterschiedlichen Substraten: Blattoberflächen verschiedener Apfelsorten.....	53
II.1.3	Untersuchung und Charakterisierung des künstlichen Haftmaterials	65
II.1.3.1	Bio-inspirierte, fibrilläre Haft-Mikrostrukturen	65
II.1.3.2.	Flüssigkeit als Mittel zur Hafterhöhung eines mikrostrukturierten Elastomers.....	74
II.1.3.3	Untersuchungen zur Haftkafterhöhung biologisch-inspirierter Adhäsive	78

II.2 Verwertbarkeit	85
II.2.1 Industrielle Verwertung (Gottlieb Binder GmbH)	85
II.2.1.1 Einsatzbereiche des Gecko® Nanoplast® Haftbands.....	85
II.2.1.2 Robotik.....	86
II.2.1.3 Medizinischer Einsatzbereich	87
II.2.2 Verwertung der Ergebnisse (AG Funktionelle Morphologie und Biomechanik, CAU Kiel).....	87
II.2.2.1 Weitere Forschung im Bereich der künstlichen Haftmaterialien.....	87
II.2.2.2 Verwertung in studentischer Lehre	88
II.2.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	88
II.2.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	89
II.3 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	89
II.4 Eigene Veröffentlichungen, Kooperationen und Öffentlichkeitsarbeit.....	89
II.4.1 Wissenschaftliche Publikationen	89
II.4.2 Teilnahme an Tagungen, Kongressen, Veranstaltungen	92
II.4.3 Eingeladene Vorträge	94
II.4.4 Öffentlichkeitsarbeit.....	96
II.4.5 Kontakte zu Industrie und potentiellen Projektpartnern.....	98
II.4.6 Eingeladene Gastreferenten und -wissenschaftler	99
II.4.7 Preise und Auszeichnungen	101

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines biomimetischen, strukturierten, klebstofffreien Haftmaterials nach Vorbild haariger biologischer Haftsysteme für Anwendungen an der Luft und unter Wasser. Das Produkt soll reversibel einsetzbar und umweltfreundlich sein.

Dies soll ermöglicht werden durch eine umfassende Analyse der Haftstrukturen bei Insekten im Bezug auf Morphologie, (Ultra-)Struktur, mechanische Eigenschaften und deren physikalische Hintergründe. Dafür ist zunächst ein Screening verschiedener Arten notwendig, um die Evolution der Haftstrukturen in unterschiedlichen Tiergruppen aufzudecken.

Während und nach der Untersuchung der biologischen Vorbilder werden die gewonnenen Erkenntnisse ausgewertet und zusammen mit dem Industriepartner die Möglichkeiten einer technischen Umsetzung ausgearbeitet. Potentielle Anwendungsfelder eines solchen Haftmaterials sind überall dort zu finden, wo reversible, rückstandsfreie Haftung benötigt wird (Industrie, Bau- und Medizinbranche, Privathaushalte).

Der Wissenstransfer in die Öffentlichkeit wird durch Vorstellung des Projekts bei Messen, Tagungen oder durch Publikationen erreicht. Dadurch ist ebenfalls ein Austausch mit anderen Wissenschaftlern und der Öffentlichkeit sowie deren Feedback gewährleistet.

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

Die Antragsteller verfügen über eine langjährige Erfahrung und große Expertise auf ihren jeweiligen Gebieten. Der Antragsteller des Lehrstuhls für Zoologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Prof. Dr. Stanislav N. Gorb, hat jahrelange Erfahrung auf dem Gebiet der Zoologie im Allgemeinen und der Haftsysteme bei Insekten im Besonderen. Für deren Untersuchung stehen zahlreiche etablierte Methoden zur Verfügung, sowie die Möglichkeiten zur Entwicklung neuer, innovativer Methoden.

Die Firma Gottlieb Binder GmbH & Co. KG besteht seit 1798 und produziert Klettverschlüsse, Klettbandsysteme, Befestigungssysteme sowie Klebstoffsysteme für eine Vielzahl von Applikationen wie z.B. die Automobilindustrie oder die Medizintechnik. Zudem investiert die Firma permanent in moderne Fertigungstechnologien und setzt auf kontinuierliche Forschung und Entwicklung.

Die Zusammenführung dieser beiden Partner bietet die Möglichkeit, das biologische und physikalische Know-How der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Gorb direkt mit der industriellen Umsetzung zu verschmelzen und einen lückenlosen Ablauf des Projekts zu gewährleisten.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung des Projekts wurde von beiden Projektpartnern (CAU Kiel, Binder GmbH) in enger Abstimmung durchgeführt. Die umfassende Vorbereitung und Planung war Voraussetzung für den reibungslosen Ablauf und die erfolgreiche Gestaltung des Vorhabens.

Bei gemeinsamen Treffen wurden die bis dahin gewonnenen Erkenntnisse ausgetauscht und Ideen für das weitere Vorgehen gesammelt. Die biologischen Hintergründe und deren technische Umsetzung konnten so möglichst gut aufeinander abgestimmt werden.

Das Vorhaben war den Kompetenzen der Projektpartner entsprechend in folgende Arbeitspakete aufgeteilt:

- Datenbanken
- Screening biologischer (Haft-)Oberflächen

- Entwicklung von Messmethoden; Reibungs- und Adhäsionstests an biologischen Oberflächen
- Systematisierung und Abstraktion der Erkenntnisse über biologische Oberflächen; Vorschläge für künstliche Haftsysteme
- Entwicklung von bio-inspirierten Haftmaterialien
- Reibungs- und Adhäsionstests an künstlichen Oberflächen (Prototypen)
- Technische Evaluation
- Entwicklung von Verfahren für die großflächige Herstellung des neuen Haftmaterials

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

I.4.1 Wissensstand in der Biologie

Haarige Haftsysteme entwickelten sich im Laufe der Evolution unabhängig voneinander in verschiedenen Tiergruppen, was für den Erfolg der Verwendung von adhäsiven Hafthaaren spricht (Gorb 2001, Gorb & Beutel 2001). Sie befähigen die Tiere über Kopf an Pflanzen, Decken, auf Wänden und glatten Oberflächen zu laufen (z. B. Stork 1980, 1983, Pelletier & Smilowitz 1987, Gorb 2001).

Die systematische Erforschung der Eigenschaften tarsaler Hafthaare an den Füßen einiger ausgewählter Arten von Fliegen, Käfern, Spinnen und Geckos führte im letzten Jahrzehnt mit dem Einsatz moderner interdisziplinärer Forschungsmethoden zu einem enormen Erkenntnisgewinn. Die Resultate sind technologisch relevant für einen anwendungsorientierten künstlichen Nachbau derartiger Strukturen. Während das Haften bei Spinnen und Geckos hauptsächlich durch van-der-Waals-Kräfte bewirkt wird, treten bei Fliegen und Käfern Kapillarkräfte in den Vordergrund. Letztere scheiden an ihren Füßen haftvermittelnde Sekretionen aus, deren Funktion und Bedeutung im Haftprozess gegenwärtig nicht vollständig aufgeklärt ist (z. B. Gorb 1998; Langer et al., 2004).

Die hohe Haftkraft der biologischen Systeme liegt in deren geometrischen Merkmalen begründet. Kontaktaufspaltung, hohes Aspektverhältnis der Einzelkontakte und deren schaufelförmigen Endkontakte sind ausschlaggebende Parameter für den Hafterfolg. Je größer das Tier, desto feiner sind die Hafthaare. Die physikalischen Aspekte wurden in den letzten Jahren intensiv diskutiert (Scherge & Gorb 2001, Arzt et al. 2003, Persson 2003, Persson & Gorb 2003, Chung & Chaudhury 2005, Gao et al. 2005). Die Übertragung der adhäsionsorientierten Geometrie biologischer Systeme auf künstliche Oberflächen mit hoher Adhäsionskraft gilt als erfolgversprechend. Insbesondere Kontaktverteilung (Autumn et al. 2000, Scherge & Gorb 2001, Arzt et al. 2003) und hexagonale Musterung (Ball 2001, Gorb 2001) wurden als hinlängliche Mechanismen der Kontakterhöhung beschrieben.

1.4.2 Stand der Technik

Die Verwendung konventioneller Klebebänder ist zumeist auf einen einmaligen Gebrauch beschränkt und mit einem hohem Materialverbrauch sowie dem Einsatz synthetischer Klebstoffe und deren chemischer Herstellung verbunden. Haftende und wieder lösbare, klebfreie Verbindungen, wie sie im Tierreich weitläufig erfolgreich zum Einsatz kommen, würden eine hervorragende, rohstoffeffiziente und nachhaltige Alternative für vielfältige Anwendungen bieten.

Einige Versuche wurden unternommen, biomimetische Haftflächen zu erzeugen. Die Herstellungsmethoden reichen von Lasertechnologie bis hin zu Mikrolithographie (Geim et al. 2003, Glassmaker et al. 2004, 2006, Ghatak et al. 2004, Majidi et al. 2004, Peressadko & Gorb 2004, Crosby et al. 2005, Northen & Turner 2005, Yurdumakan et al. 2005). Im Gegensatz zu den biologischen Vorbildern, zeigen die gegenwärtigen Imitate eine stark begrenzte „Überlebensdauer“ von häufig nur einem Zyklus und eine wesentlich niedrigere Haftkraft. Probleme bestehen in der Gestaltung der Einzelelemente, deren Kontaktverteilung, deren zu großen oder zu kleinen Aspektverhältnis, deren Dimension und Dichte, deren Neigungswinkel, Hierarchie, Form des Kontaktes, Asymmetrie, Gradientenmaterial und Non-Koagulation.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt „Biologische Inspiration für klebstofffreies Haftmaterial“ ist als Kooperationsprojekt unter Mithilfe der Arbeitsgruppe „Funktionelle Morphologie und Biomechanik“ am Lehrstuhl für Zoologie in Kiel und der Gottlieb Binder GmbH & Co. KG entstanden. Es erfolgten regelmäßige Absprachen und Rückkopplungen zwischen den Projektpartnern, welche zu den in diesem Bericht separat dargestellten Ergebnissen entscheidend beigetragen haben.

Der Austausch mit anderen Wissenschaftlern aus dem Bereich der Biologie und Bionik war durch die Mitgliedschaft des Antragstellers Herrn Prof. Gorb im BMBF-geförderten Bionik-Kompetenz-Netzwerk „BioKoN“ gegeben. Hier wurde eine stetige wissenschaftliche Diskussion ermöglicht, z.B. durch Treffen auf Tagungen und Messen.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Erzieltes Ergebnis

Ergebnis des Projekts ist die Entwicklung und Markteinführung eines biologisch inspirierten, klebstofffreien Haftmaterials. Vorbild für das künstlich hergestellte Material ist der Haftmechanismus von Insekten, im Speziellen des männlichen Ampferblattkäfers *Gastrophysa viridula*. Das von der Firma Gottlieb Binder GmbH & Co. KG produzierte Gecko[®] Nanoplast[®] ist das erste kommerziell verfügbare klebstofffreie, strukturierte Haftmaterial nach biologischem Vorbild.

Dieses erfolgreiche Ergebnis war möglich durch die breit angelegte biologische Grundlagenforschung. Daran anschließend wurden die physikalischen Hintergründe der Haftung bei Insekten erforscht, und diese Ergebnisse zusammengefasst als Basis für die technische Umsetzung in erste Prototypen eines künstlichen Haftmaterials verwendet. Die Ergebnisse werden nachfolgend im Einzelnen dargestellt.

II.1.1 Struktur und Funktion der Haftstrukturen verschiedener Tierarten

II.1.1.1 Screening biologischer Systeme

Für das Herausfiltern besonderer Hafteigenschaften, –strukturen und –effekte wurde mit breiten systematisch vergleichenden Studien (Screening) von verschiedenen Tierarten begonnen. In den ersten drei Monaten haben wir Haft- und Reibungskräfte an den Oberflächen mit unterschiedlichen Rauheiten und Oberflächenenergie bei fünf Insektenarten gemessen (Zentrifugalkrafttester BIOSPIN-01) (Abb. 1). Danach wurden die Tiere mit Hilfe des neu

angeschafften Laser Scanning Mikroskops Zeiss LSM 710 mikroskopisch untersucht.

Außerdem wurde die Geometrie der Fußabdrücke mit unterschiedlichen Techniken (Lichtmikroskopie, Weisslichtinterferometrie, Rasterkraftmikroskopie) untersucht (Abb. 2). Diese Daten werden im späteren Verlauf des Projekts wichtig für das Verständnis der Rolle von Flüssigkeiten bei der Haftkraftgenerierung in biologischen Systemen und der Implementierung der Flüssigkeiten (Wasser, Glycerin, Öle) in biologisch-inspirierte mikrostrukturierte Polymersysteme.

	HORIZONTAL				VERTICAL			
	body w. [mg]	F [mN]	Acc	Safety/comp	body w. [mg]	F [mN]	Acc	Safety/comp
<i>Gastrophysa viridula</i>								
mean	24,14	15,12	723,42	72,34	24,34	5,10	283,65	28,37
Std	13,53	9,71	458,91	45,89	14,28	2,18	208,45	20,84
male								
mean	36,37	19,06	526,51	52,65	37,64	5,78	161,08	16,11
Std	7,91	10,56	261,97	26,20	7,03	1,87	67,58	6,76
female								
mean	11,90	11,17	920,33	92,03	11,03	4,41	406,23	40,62
Std	1,73	6,84	525,70	52,57	1,64	2,27	228,95	22,90
<i>Leptinotarsa decemlineata</i>								
mean	153,37	64,81	428,57	42,86	153,37	18,22	118,97	11,90
Std	24,47	35,62	232,63	23,26	24,47	9,73	64,03	6,40
male								
mean	135,40	56,22	417,64	41,76	135,40	15,08	111,06	11,11
Std	15,70	29,03	210,92	21,09	15,69	8,52	63,94	6,39
female								
mean	171,33	73,40	439,49	43,95	171,33	21,37	126,88	12,69
Std	17,47	39,47	253,09	25,31	17,47	9,89	63,44	6,34

Abbildung 1: Daten der Reibungs- (Horizontal) und Adhäsionsmessung (Vertical) von zwei ausgewählten Insektenarten *Gastrophysa viridula* (Ampferblattkäfer) und *Leptinotarsa decemlineata* (Kartoffelkäfer) auf einer Plexiglassoberfläche. Body w. (mg) = Körpermasse in mg. F[mN] = Kraft in mN. Acc. = maximale Beschleunigung. Safety/comp = Relation zwischen gemessener Kraft und dem Körpergewicht. Male = männliche Individuen. Female = weibliche Individuen. Mean = Durchschnittswert für männliche und weibliche Individuen. Std. = Standardabweichung.

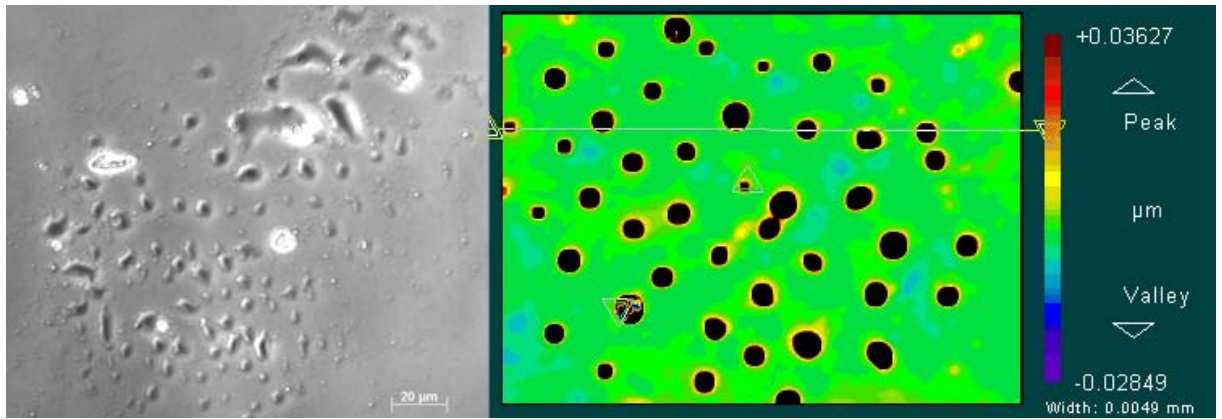


Abbildung 2: Fußabdrücke des Käfers *Gastrophysa viridula* and der Plexiglas-Oberfläche. Links: Lichtmikroskopische Aufnahme in Phasenkontrast; Rechts: Eine Aufnahme mit Weisslicht-interferometer. Die schwarzen Punkte deuten darauf hin, dass der Kontaktwinkel zwischen der Oberfläche und der Flüssigkeit größer als 36° ist.

II.1.1.2 Haft- und Reibungseigenschaften der tarsalen Haftstrukturen von zwei Stabheuschreckenarten (Phasmatodea)

In den vergangenen Jahren beschäftigten sich viele Studien mit den Haftsystemen verschiedener Tiere, darunter Geckos, Fliegen, Käfer, Hymenoptera und Orthoptera. Bei diesen Arbeiten wurden zwei verschiedene Arten von Haftkissen entdeckt. Zum einen haarige Strukturen bei Geckos, Spinnen und einigen Insekten, zum anderen glatte Strukturen, die bei Heuschrecken und den meisten Hautflüglern gefunden wurden. Beide Strukturen haben gemein, dass sie sich der Oberfläche anpassen können. Im Falle der haarigen Strukturen geschieht dies durch die vielen kleinen, flexiblen Härchen (Setae), die glatten Strukturen bewerkstelligen dies durch weiche äußere Kutikula-Schichten. Durch diese Mechanismen wird die Ausbildung einer maximalen Kontaktfläche zwischen dem Fuß des Tieres und dem Untergrund gewährleistet, was einen Anstieg von Haftung und Reibung zur Folge hat.

Es ist bekannt, dass eine raue Oberfläche zu einer Verringerung der Haftung sowohl bei glatten als auch bei haarigen Haftstrukturen führt. Die Mehrzahl dieser Arbeiten konzentriert sich dabei jedoch auf einen bestimmten Typ von Haftkissen, glatt oder mikrostrukturiert. Es gibt lediglich einen Versuch, die Funktion glatter und haariger Haftstrukturen zu vergleichen, aber diese Veröffentlichung zieht dazu zwei phylogenetisch entfernte Insektengruppen

heran, und zwar Stabheuschrecken (Phasmatodea) und Käfer (Coleoptera). Darüberhinaus betrachten die meisten Publikationen entweder Haftung oder Reibung, jedoch nicht beide Phänomene.

Die hier vorgestellte Arbeit wurde unternommen, um die Kontaktphänomene Haftung und Reibung auf einem glatten und einem rauen Substrat in zwei nahe verwandten Insektenvertretern mit unterschiedlichen Haftstrukturen zu vergleichen; und um daraus Schlüsse auf die Rolle der Mikrostrukturierung der Padoberfläche in Bezug auf die Haft- und Reibungseigenschaften zu ziehen. Wir untersuchten die tarsalen Haftkissen (Euplantulae) von zwei Stabheuschreckenarten (Phasmatodea): *Carausius morosus* und *Cuniculina impigra* (syn. *Medauroidea extradentata*). Die Phasmiden tragen, ähnlich wie die Heuschrecken, paarige Euplantulae an den ersten vier Tarsalsegmenten. Diese Pads gehören zu den glatten Haftstrukturen, da sie nicht mit den für haarige Kissen typischen Setae bedeckt sind. Die Euplantulae von *C. morosus* jedoch tragen kleine Noppen, während jene von *C. impigra* auch im Mikrometerbereich glatt sind (Abb. 3).

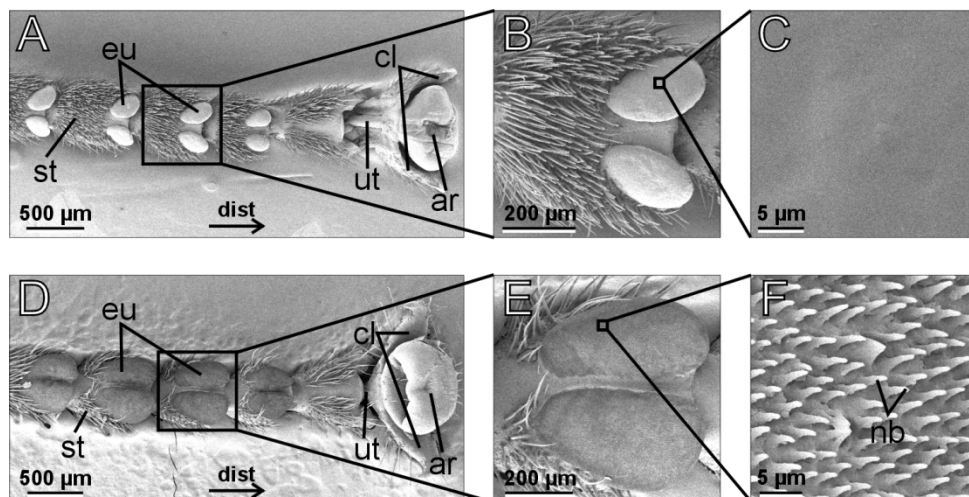


Abbildung 3: Tarsen der Hinterbeine von *C. impigra* (A) und *C. morosus* (D) mit paarigen Euplantulae (eu) an den vier proximalen Tarsalgliedern und einem unpaarigen Arolium (ar) am Prätersus zwischen den Krallen (cl). B. Euplantula-Paar an einem Tarsalglied von *C. impigra* mit glatter Oberfläche (C). E. Euplantula-Paar an einem Tarsalglied von *C. morosus* bedeckt mit Noppen (nb) (F) ut, Unguitractor; st, nicht-adhäsive Setae.

Es ist anzunehmen, dass die unterschiedlich strukturierten Euplantulae Unterschiede in den Haft- und Reibungseigenschaften bedingen. Frühere Autoren haben gezeigt, dass Haftstrukturen mit Setae besonders auf rauen

Substraten starke Haftung und Reibung erzeugen, da sie in der Lage sind, sich mit ihren spezialisierten Mikrostrukturen an eine unebene Oberfläche anzupassen. Es wurde klar gezeigt, dass sogar krallenlose Insekten mit haarigen Haftkissen eine recht gute Haftung auf rauem Untergrund haben, wenn die Oberflächenunebenheiten zwischen 3 und 12 μm liegen, während glatte Pads versagen. Daher war unsere Annahme, dass die genoppten Euplantulae von *C. morosus* eine stärkere Haftung und Reibung auf dem rauen Substrat zeigen als die glatten Kissen von *C. impigra*. In der vorliegenden Studie verglichen wir mikrostrukturelle Eigenschaften der Euplantulae beider Arten mittels mikroskopischer Techniken, und die Haft- und Reibungseigenschaften auf glatter und rauer Fläche mit Hilfe eines Kraftmessinstruments.

Charakterisierung der Euplantulae-Oberflächen

Die Tarsen der beiden Stabheuschreckenarten wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht. An Vorder-, Mittel- und Hinterbeinen beider Arten wurden die paarigen Euplantulae an den ersten vier Tarsalgliedern gefunden. Die Oberflächenstruktur der Pads bei *C. impigra* erwies sich als glatt, während die Oberfläche der Haftkissen von *C. morosus* mit kleinen Noppen bedeckt ist, welche an der Basis ca. 1,5 μm und an der Spitze 0,5 μm Durchmesser besitzen. Die Haftkissen wiesen bei beiden Arten weder Unterschiede zwischen den verschiedenen Beinen, noch zwischen den verschiedenen Euplantulae am selben Tarsus auf.

Haft- und Reibungskraftmessungen

Die Messungen der Haft- und Reibungskräfte wurden mit dem Kraftmessinstrument Biotester BASALT-01 (Tetra GmbH, Ilmenau) durchgeführt. Dieses besteht aus einer Plattform, auf der die lebenden Tiere mit der ventralen Seite nach oben fixiert wurden, so dass der zu untersuchende Tarsus gut zugänglich war. Eine in vertikaler und horizontaler Richtung auslenkbare Glasfeder wurde gegenüber der Euplantula an einem beweglichen Arm befestigt, an welcher die raue (Oberflächenunebenheiten von 3 μm) oder glatte Testoberfläche angebracht war. Mit diesen beiden Oberflächen wurde die

Haftung und Reibung der Pads gemessen. Glasfeder und Haftkissen konnten über Bewegungen von Plattform bzw. Arm in Kontakt gebracht und wieder voneinander entfernt werden. Die Auslenkung der Feder wurde gleichzeitig mittels eines faseroptischen Systems und zwei an der Feder angebrachten Spiegeln gemessen (Abb. 4). Durch die vorher bestimmten vertikalen und horizontalen Federkonstanten konnte aus der Auslenkung der Feder die Haft- bzw. Reibungskraft berechnet werden.

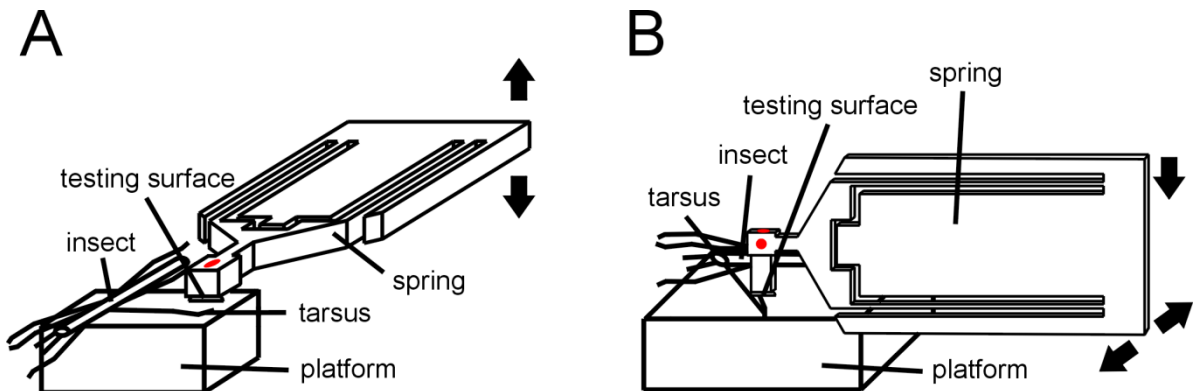


Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Haft- (A) und Reibungsmessungen (B) Der Tarsus eines lebenden Insekts wird auf der Plattform fixiert und die Testoberfläche ist an der Glasfeder befestigt. Federbewegungen sind durch schwarze Pfeile gekennzeichnet. Rote Punkte symbolisieren die Stellen, an denen die Federauslenkung registriert wurde.

Die Messungen der Haftkraft ergaben für die glatte Testoberfläche eine signifikant höhere Haftung der glatten Pads von *C. impigra* ($F = 78,2 \mu\text{N}$, $n = 30$) als der genoppten Pads von *C. morosus* ($F = 38,3 \mu\text{N}$, $n = 17$). Auf der rauen Oberfläche zeigte sich kein Unterschied zwischen den beiden Arten (*C. impigra*: $F = 42,4 \mu\text{N}$, $n = 17$; *C. morosus*: $F = 46,0 \mu\text{N}$, $n = 13$). Ein Vergleich innerhalb der Arten zeigte, dass die glatten Euplantulae von *C. impigra* auf dem glatten Substrat stärker haften als auf dem rauen, während *C. morosus* keine Unterschiede zwischen den Oberflächen offenbarte (Abb. 5).

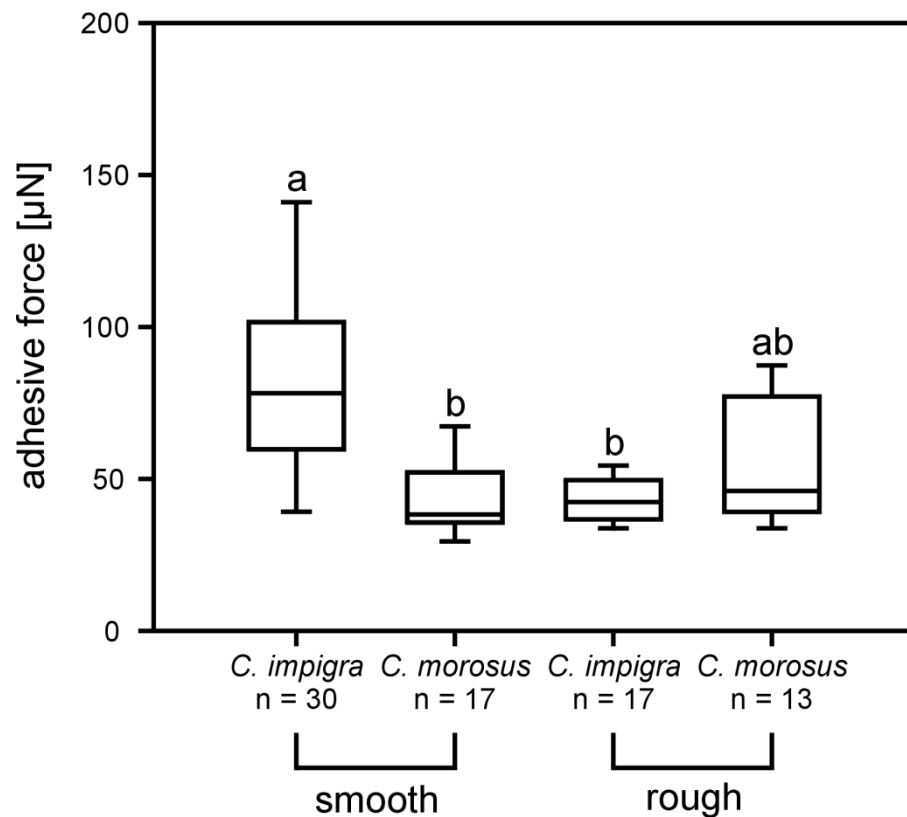


Abbildung 5: Haftkräfte von *C. impigra* und *C. morosus* auf der glatten und auf der rauen Oberfläche. Die Plots zeigen die Median (Mittellinien) und die Quartilsabstände (Boxen), die Antennen zeigen die 10%- und 90%-Perzentile.

Die Reibungsmessungen wurden mit den gleichen Testsubstraten gemessen, die bei den Haftversuchen verwendet wurden. Dabei unterschieden wir die Reibungskräfte in distaler und proximaler Richtung, um mögliche anisotrope Effekte zu finden. Dies war nicht der Fall, bei beiden Arten fanden wir keine Unterschiede zwischen den Reibungsrichtungen. Daher fassten wir die Werte beider Richtungen für die weitere Auswertung zusammen. Auf der glatten Oberfläche zeigten die glatten Haftkissen von *C. impigra* eine höhere Reibung ($F = 1740,0 \mu\text{N}$, $n = 25$) als die genoppten Pads von *C. morosus* ($F = 501,8 \mu\text{N}$, $n = 22$). Auf dem rauen Substrat wurde kein Unterschied entdeckt (*C. impigra*: $F = 894,9 \mu\text{N}$, $n = 22$; *C. morosus*: $F = 853,9 \mu\text{N}$, $n = 22$). Die Reibungswerte von *C. impigra* waren dabei auf der glatten Oberfläche signifikant höher als auf der rauen, während bei *C. morosus* das Gegenteil der Fall war. Hier war die Reibung auf der rauen Oberfläche höher als auf der glatten (Abb. 6).

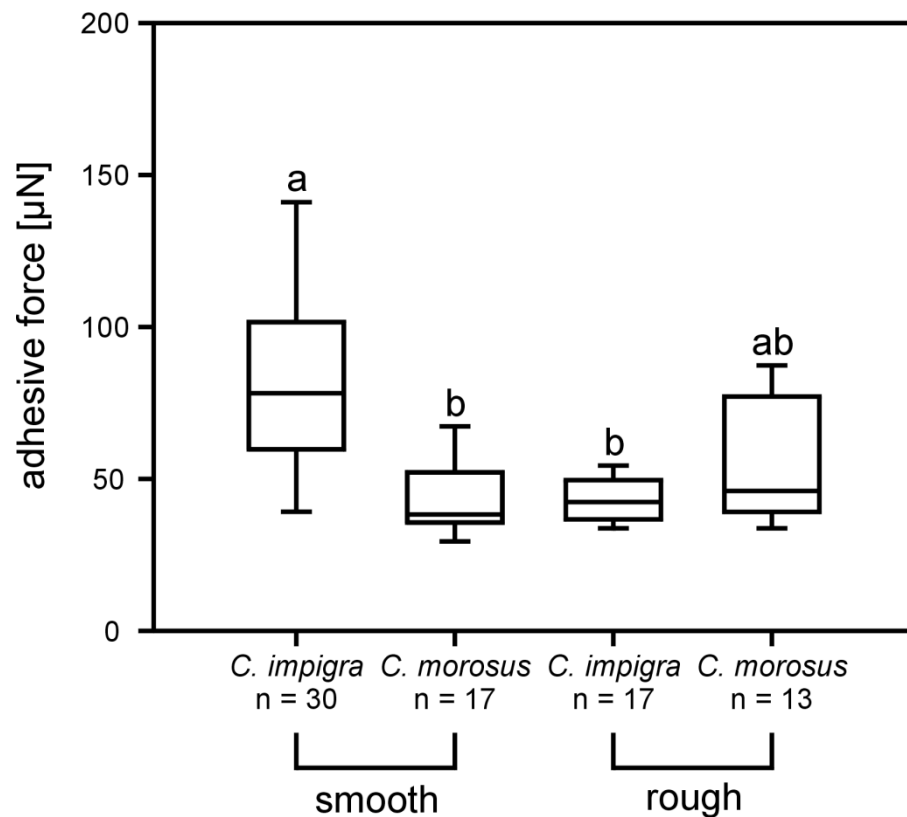


Abbildung 6: Reibungskräfte von *C. impigra* und *C. morosus* auf der glatten und der rauen Oberfläche. Die Werte für distale und proximale Reibung wurden zusammengefasst, da keine Unterschiede zwischen den Richtungen festgestellt wurden. Die Plots zeigen die Median (Mittellinien) und die Quartilsabstände (Boxen), die Antennen zeigen die 10%- und 90%-Perzentile.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die glatten Haftkissen stärker an glatten Oberflächen haften als die genoppten Haftkissen. Das kann durch die größere Kontaktfläche erklärt werden, die bei einem Kontakt zwischen glattem Kissen und glattem Substrat zustande kommt, im Vergleich zum Kontakt zwischen genopptem Kissen und glattem Substrat. Dieses Ergebnis ist von großer Bedeutung für die Herstellung künstlicher fibrillärer Haftmaterialien, da es zeigt, dass einfache zylindrische Strukturen nicht in der Lage sind, die Haftung auf flachen, glatten Substraten zu erhöhen, und dass eine Aufteilung der Kontakte einen Anstieg der Haftung nur auf rauen oder unebenen Substraten bewirken kann. Eine Verbesserung der Haftung mikrostrukturierter Pads auf glatten, ebenen Substraten kann nur durch bestimmte Formen (Pilzkopf- oder Spatula-förmig) an den Spitzen der Mikrostrukturen erreicht werden.

Es ist bekannt, dass eine starke Haftung eine maximale Kontaktfläche zwischen zwei Oberflächen benötigt. Auf einem glatten Substrat kann ein glattes Haftkissen leicht eine große Kontaktfläche herstellen, während Noppen oder

Zylinder nur eine kleine effektive Kontaktfläche mit dem Untergrund bilden können. Auf einer rauen Oberfläche hingegen kann sich eine glatte Euplantula nur dann ausreichend an die Oberfläche anpassen, wenn die Struktur weich genug und die Unebenheiten nicht zu groß sind. Haarige Pads können sich aufgrund der Flexibilität ihrer Spatulae und der hierarchischen Anordnung (Spinnen, Geckos) ihrer Setae an gewisse unebene Oberflächen effektiver anpassen. Ihre Anpassungsfähigkeit ist natürlich begrenzt durch die charakteristische Größe ihrer Setae-Spitzen, aber bedingt durch die stärker ausgeprägte Anpassungsmöglichkeit erreichen sie auf einer größeren Spanne von Oberflächenrauheiten eine ausreichende Kontaktfläche verglichen mit den glatten Haftkissen.

Die genoppten Haftkissen von *C. morosus* haben in dieser Hinsicht eine funktionell Ähnlichkeit zu haarigen Pads. Sie sind in der Lage, sich besser an Oberflächenunebenheiten einer gewissen Größenordnung anzupassen, und können daher auf diesen Substraten eine bessere Haftung herstellen. Weiterhin kann eine weiche, genoppte Struktur im Kontakt mit einer steiferen rauen Oberfläche, zusätzliche Kontakte mit den Seiten der parabolischen Mikrostrukturen herstellen. In diesem Fall würden während des Abziehvorgangs zusätzlich Scherkräfte zur gemessenen Haftung auf der rauen Oberfläche beitragen.

Unsere aus den Versuchen mit Stabheuschrecken gewonnenen Ergebnisse reflektieren Verhaltensunterschiede der beiden Arten in ihrer natürlichen Umgebung. Wie alle Stabheuschrecken imitieren sie Teile von Pflanzen um von ihren Prädatoren nicht entdeckt zu werden. *Cunculina impigra* mit glatten Euplantulae sitzt normalerweise mit den Mittel- und Hinterbeinen auf den glatten Blattoberflächen von Pflanzen, während sie die Vorderbeine ausstrecken. In dieser Position bleiben sie häufig unbeweglich sitzen und imitieren Pflanzenteile wie kleine Äste. *Carausius morosus* hingegen hängen häufig mit den Tarsen der Vorderbeine an Ästen, während sie die Mittel- und Hinterbeine ebenfalls eng an den Körper anlegen und so kaum von einem Zweig zu unterscheiden sind. Hierfür sind die genoppten Euplantulae wahrscheinlich besser geeignet als die glatten, da die Äste eine rauere Struktur

aufweisen als die Blattoberflächen, auf denen sich *C. impigra* mit ihren glatten Haftkissen festhält.

Unsere Versuche legen nahe, dass glatte Haftmaterialien Vorteile auf glatten Strukturen besitzen, während mikrostrukturierte Adhäsive besser geeignet sind, um eine gute Haftung auf einer der Mikrostrukturierung entsprechenden Spanne an Rauheiten gewährleistet. Dies ist ein wichtiges Erkenntnis für die Herstellung und Anwendung von künstlichen Haftmaterialien. Je nach Einsatzart sind dementsprechende Haftmaterialien zu wählen, um eine optimale Haftung zu erzielen.

II.1.1.3 Muskeleinsatz zur Haltungskontrolle bei Stabheuschrecken

Viele Insekten sind dafür bekannt, dass sie sich mittels Haft- und Reibungskräften, die von speziellen Haftstrukturen erzeugt werden, an unterschiedlichsten Oberflächen festhalten können (Gorb and Beutel, 2001; Autumn and Peattie, 2002; Federle et al., 2002; Gorb, 2004). Dabei sind viele Arten in der Lage sowohl auf glatten als auch auf rauen Oberflächen zu haften und sich fortzubewegen, selbst an senkrechten Wänden oder an der Decke. Zur Erzeugung der benötigten Haft- und Reibungskräfte kommen dabei verschiedene Strukturen zum Einsatz. Auf genügend rauen Oberflächen werden vornehmlich die Krallen eingesetzt. Diese sitzen bei allen Insekten am Prätarsus und verhaken sich in Oberflächenunebenheiten, wenn diese groß genug sind und den Krallen damit ausreichend Widerstand bieten (Lees and Hardie, 1988; Dai et al., 2002). Sind die Oberflächen zu glatt für die Krallen, so dass diese beim Versuch des Festhaltens abrutschen, werden Haftkissen verwendet, die auf glatten Flächen eine gute Haftung bieten. Diese können an den einzelnen Tarsalgliedern sitzen (Euplantulae), oder auch am Prätarsus (Arolium, Pulvilli) (Beutel and Gorb, 2001). Diese Haftkissen können entweder glatt (z.B. Heuschrecken, einige Stabheuschrecken) (Gorb et al., 2000; Jiao et al., 2000; Drechsler and Federle, 2006; Goodwyn et al., 2006) oder haarig sein (z.B. Käfer, Fliegen) (Gorb, 1998; Gorb and Gorb, 2002; Langer et al., 2004). Bisher ist nicht bekannt, ob das Festhalten an einer Oberfläche ein passiver oder aktiver Vorgang ist. Das heißt, es ist nicht klar, ob die Tiere mit ihren Haftorganen eine gute Haftung herstellen können und diese danach passiv

bestehen bleibt, oder ob eine dauernde Muskelaktivität erforderlich ist, um die Haftung aufrechtzuerhalten. Desweiteren ist die generelle muskuläre Steuerung der Haftorgane nicht bekannt, also wann welche Tarsalmuskeln rekrutiert werden um eine gute Haftung bei der Lokomotion zu gewährleisten.

In unserer Studie untersuchten wir die beiden Stabheuschreckenarten *Carausius morosus* und *Cuniculina impigra* (syn. *Medauroidea extradentata*). Das Ziel war, die Aktivität eines Muskels aufzuzeichnen (Elektromyogramm, EMG), der für die Kontrolle des Prätarsus und damit auch der Krallen zuständig ist, der *Musculus retractor unguis* oder Krallenrückziehmuskel. Dieser Muskel liegt bei den Stabheuschrecken dreiteilig im Bein vor, der erste Kopf des Muskels im Femur nahe der Coxa, der zweite und dritte Kopf proximal bzw. distal in der Tibia (Abb. 7) (Radnikow and Bässler, 1991). Wir leiteten die elektrische Aktivität des mittleren Muskelteils ab, während die Tiere auf einer drehbaren Plexiglasplatte saßen. Auf dieser Platte konnte die Muskelaktivität in verschiedenen Situationen gemessen werden: auf einer horizontalen Fläche, an einer senkrechten Wand, kopfüber an der Decke sowie während sämtlicher Drehungen von einer Position in eine andere. Auf der einen Seite der Platte war Stoff aufgebracht, so dass die Experimente auf einer glatten (Plexiglas) und einer rauen Seite (Stoff) durchgeführt werden konnten.

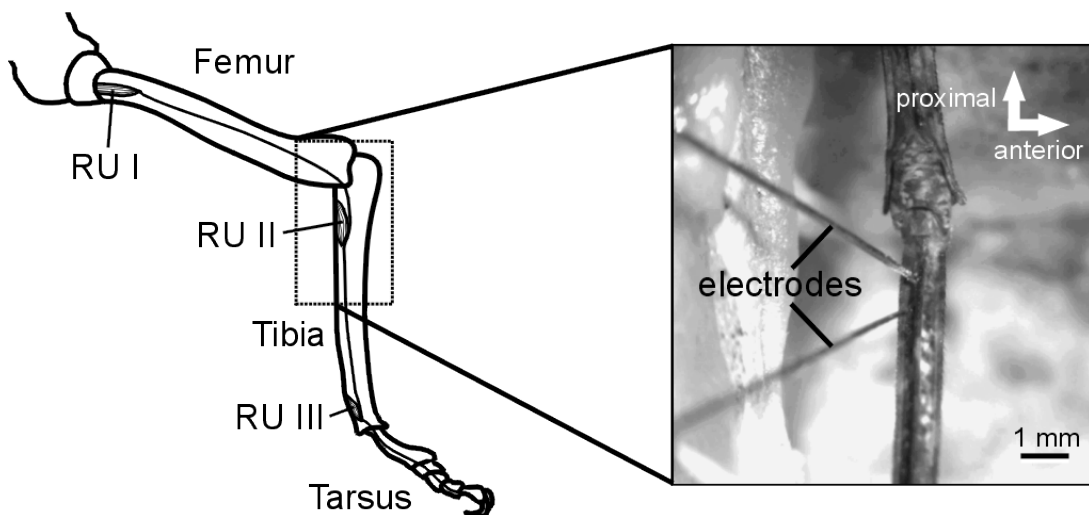


Abbildung 7: Zeichnung eines Stabheuschreckenbeins mit den drei Köpfen des *M. retractor unguis* (RU I, RU II, RU III) und der verbindenden Sehne. Das rechte Bild zeigt den Bereich des Femur-Tibia-Gelenks einer Stabheuschrecke von ventral mit den Elektroden, die in den mittleren Teil des Muskels eingestochen wurden.

Messung der Muskelaktivität

Zur Messung der Muskelaktivität in den verschiedenen Situationen wurden Wolfram-Elektroden in die Tibia der Beine eingestochen, an der Stelle des mittleren Muskelkopfes (Abb. 7). Die Elektroden waren über Kupferdraht mit einem Kabel verbunden, das die Muskelsignale zu einem Verstärker und schließlich zur Datenerfassungskarte im Computer weiterleitete. Typischerweise wurden zwei verschiedene muskuläre Einheiten aufgezeichnet und dementsprechend in der Auswertung unterschieden (Abb. 8). Darunter waren tonische Einheiten mit kleiner Amplitude, die ständig aktiv waren, sowie phasische Einheiten mit höherer Amplitude, die hauptsächlich während der Drehungen der Platte Aktivität zeigten.

Vergleich der Muskelaktivität in verschiedenen Positionen

Ein Maß um die Aktivität eines Muskels zu beurteilen ist die Frequenz, mit der der Muskel „feuert“ (Spikefrequenz), also mit der er elektrische Signale von den Motoneuronen erhält und diese in Kontraktionen umsetzt. Wir berechneten die Frequenzen getrennt für die tonischen und phasischen Einheiten und unterschieden dann jeweils für beide in die verschiedenen Positionen und Drehungen (Abb. 9).

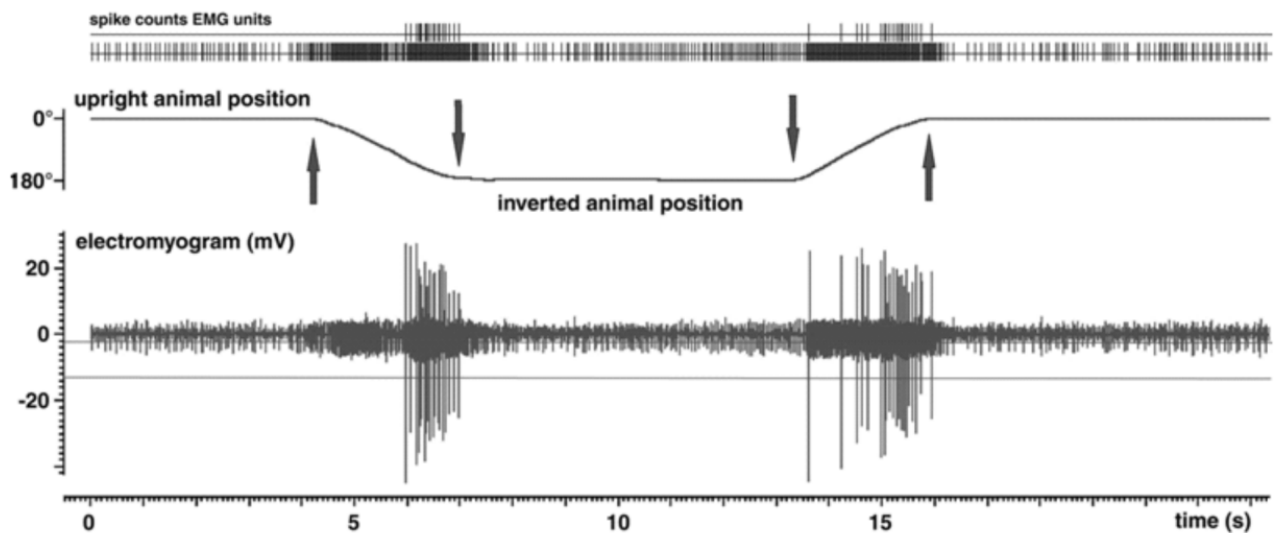


Abbildung 8: Beispiel einer Aufnahme des Retractor unguis in *Carausius morosus*. Die unterste Spur zeigt das Elektromyogramm mit einer tonischen und einer phasischen Einheit. Darüber ist die Position der Platte angezeigt. Die Pfeile markieren jeweils den Anfang und das Ende zweier 180°-Drehungen von der horizontalen zur invertierten Position und zurück. Die beiden obersten Spuren zeigen die registrierten Spikes für die phasische (oben) und die tonische (unten) Muskeleinheit. Die horizontalen Linien in der EMG-Spur kennzeichnen die Schwellenwerte, die zur Erfassung der kleinen (obere Linie) und großen (untere Linie) Spikes verwendet wurden.

Dabei war zunächst festzustellen, dass die Ergebnisse der beiden Arten sich nicht unterschieden. Ebenso gab es bei keiner der beiden Arten Unterschiede in den Spikefrequenzen zwischen der glatten und der rauen Seite der drehbaren Plattform. Es konnten jedoch signifikante Unterschiede in der Spikefrequenz festgestellt werden, wenn die einzelnen Positionen (horizontal, vertikal, invertiert) und Drehungen verglichen wurden. Dabei wurden folgende Drehungen der Platte berücksichtigt: 90°-Drehungen von horizontal nach vertikal, vertikal nach horizontal, vertikal nach invertiert, invertiert nach vertikal; 180°-Drehungen von horizontal nach invertiert, invertiert nach horizontal, vertikal nach vertikal; 360°-Drehung von invertiert nach invertiert. Hier war zu sehen, dass die Spikefrequenz bei den Drehungen tendenziell höher lag als bei den stationären Positionen (horizontal, vertikal, invertiert). Diese Tendenz war sowohl für die tonischen als auch für die phasischen Einheiten zu erkennen, statistisch belegbar war sie jedoch lediglich für die phasischen Einheiten. Hier waren die stationären Positionen jeweils von einigen Drehungen verschieden, jedoch nicht untereinander. Innerhalb der Drehungen war noch ein Trend zu höheren Frequenzen zu erkennen bei Drehungen in ungünstigere Positionen, was das Festhalten betrifft. Damit sind Positionen gemeint, die von den Tieren

potentiell mehr Anstrengung erfordern, sich festzuhalten, wie z.B. eine Drehung von horizontal nach vertikal. Dieser Trend konnte für einige Vergleiche der Drehungen auch statistisch belegt werden. Betrachtet man die stationären Positionen untereinander, fällt auf, dass diese sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Dies war in zweierlei Hinsicht ein überraschendes Ergebnis. Erstens zeigt es, dass der Muskel ständig aktiv ist, dass also auch beim horizontalen Stehen eine dauernde Muskelaktivität erforderlich ist. Zweitens lässt sich daraus schließen, dass die Muskelaktivität nicht höher ist, wenn das Tier an der senkrechten Wand oder an der Decke sitzt, im Vergleich zur waagrechten Fläche. Dies ist einerseits sehr verblüffend, andererseits zeigt es, dass die Tiere eine Möglichkeit gefunden haben, das Festhalten an geneigten Flächen relativ energieschonend zu gestalten. Allerdings sieht man anhand der Messungen auch, dass es nicht – wie in der Fragestellung vermutet – eine rein passive Angelegenheit ist. Wie oben erwähnt ließ sich kein Unterschied zwischen der glatten und der rauen Oberfläche der Platte feststellen. Dies scheint erstaunlich, da die Krallen auf der glatten Oberfläche keinerlei Möglichkeit haben, sich einzuhaken. Nichtsdestotrotz zeigt der Muskel dort die gleiche Aktivität wie auf der rauen Oberfläche. Dies lässt den Rückschluss zu, dass der *M. retractor unguis* als Prätersalmuskel sowohl den Einsatz der Krallen als auch des Aroliums als weiteres Haftorgan für glatte Oberflächen am Prätersus steuert. Dass zwei solch grundverschiedene Haftstrukturen von ein und demselben Muskel kontrolliert werden, wurde so bisher noch nicht gezeigt. Es ist bisher lediglich ein mechanischer Zusammenhang dieser beiden Haftsysteme bei Ameisen und Bienen gezeigt worden (Federle et al., 2001; Endlein and Federle, 2008), jedoch nicht die aktive Steuerung der beiden Strukturen durch den selben Muskel.

Die oben erwähnte Tendenz der tonischen Einheiten zu höheren Spikefrequenzen bei Drehungen konnte statistisch belegt werden, wenn wir die einzelnen Positionen und Drehungen folgendermaßen in drei Gruppen zusammenfassten: (1) stationär, (2) Drehungen in günstigere Positionen, (3) Drehungen in ungünstigere Positionen. Mit dieser Zusammenfassung wurde der erkennbare Trend auch statistisch untermauert (Abb. 10).

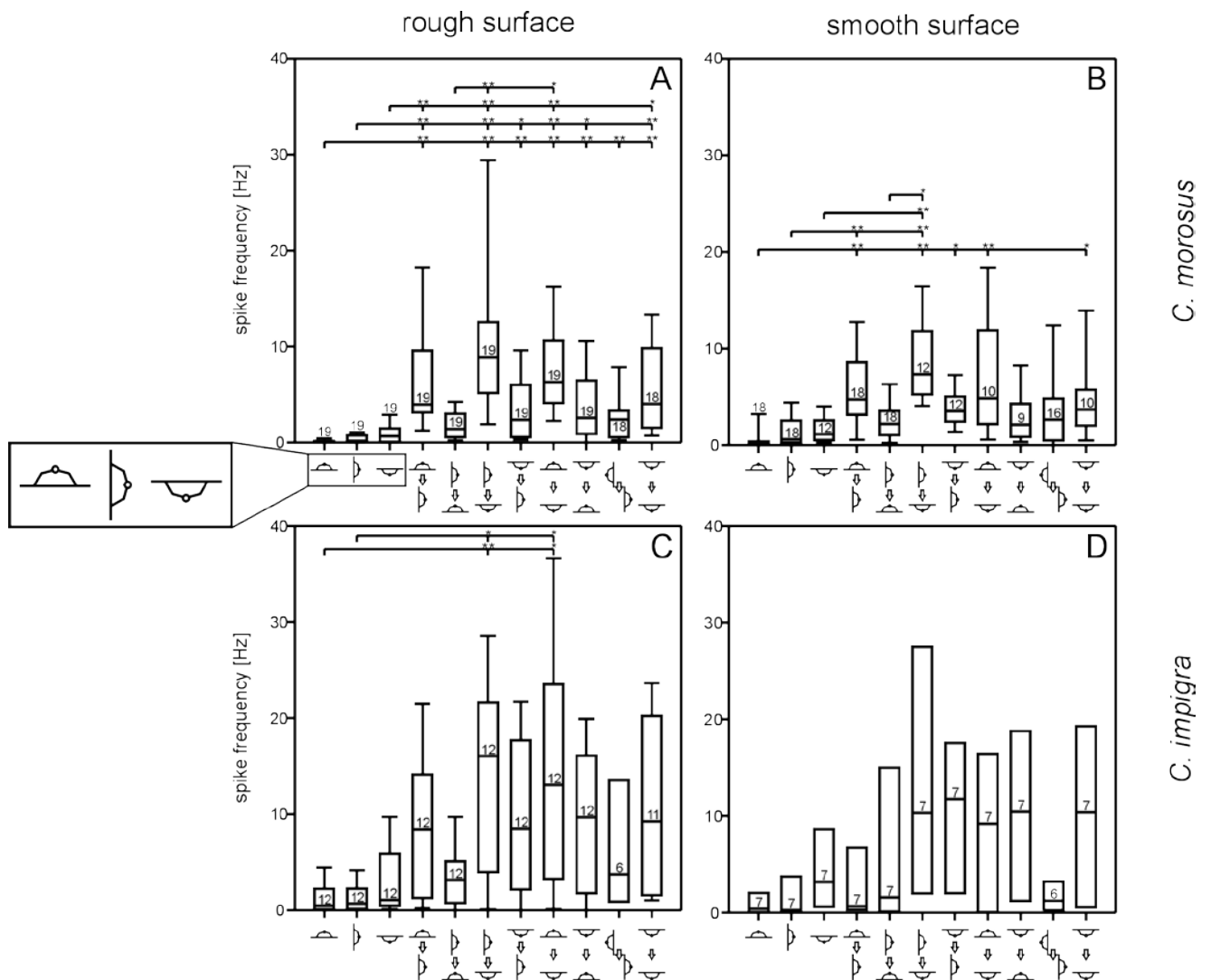


Abbildung 9: Vergleich der verschiedenen stationären Phasen und Drehungen. Die Spikefrequenzen für die phasischen Einheiten von *Carausius morosus* (A,B) und *Cuniculina impigra* (C,D) sind gezeigt. Für beide Arten sind die Ergebnisse der rauhen (A,C) und glatten Oberfläche (B,D) dargestellt. Die Box-Plots zeigen den Median (Linie in der Box) und den Interquartilsabstand (Boxen), die Whisker geben die 10%- und 90%-Perzentile an. Die Zahlen in oder über den Boxen bezeichnen die Anzahl der Messungen. Der eingefügte Kasten zeigt eine Vergrößerung der Symbole unterhalb der Boxen, die einen Querschnitt durch die Stabheuschrecke (Kreis = Körper; abgewinkelte Linien = Beine) und die Plattform (gerade Linie) darstellen. Von links nach rechts: horizontale, vertikale, invertierte Position der Tiere. Die ersten drei Boxen stehen für die stationären Phasen, dann folgen die Drehungen von einer Ausgangsposition (oben) in eine Zielposition (unten).

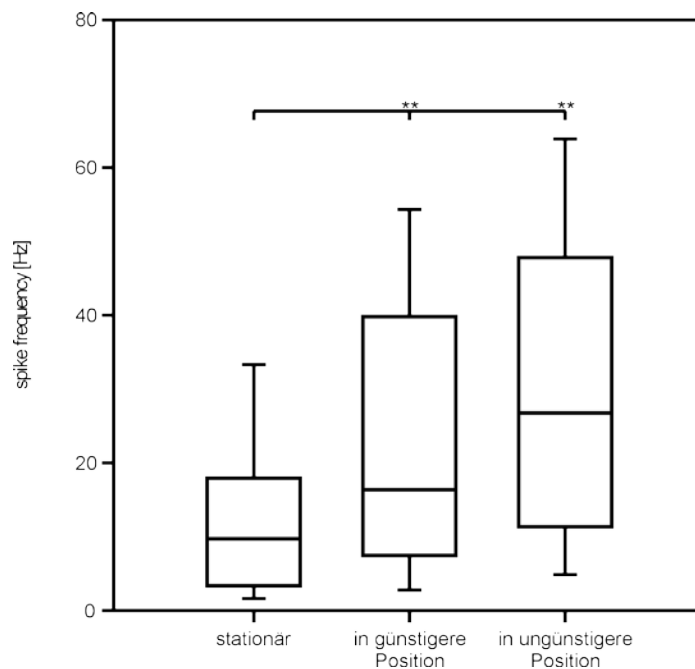


Abbildung 10: Vergleich der stationären Phasen mit den Drehungen, die in Drehungen in günstigere und Drehungen in ungünstigere Positionen zusammengefasst wurden. Hier sind die Spikefrequenzen der tonischen Einheiten von *Carausius morosus* gezeigt, zusammengefasst für die glatte und die raue Oberfläche. Für eine Beschreibung der Boxplots, siehe Abb. 9.

Diese Ergebnisse tragen dazu bei, das Verständnis der Haftung von Insekten zu vervollständigen. Die Nachbildung der Haftstrukturen für technische Anwendungen bezieht fast immer mit ein, dass die Strukturen passiv haften müssen (Klebeband etc.). Wir konnten zeigen, dass dies bei den natürlichen Vorbildern nicht der Fall ist, da hier immer eine gewisse Kraft ausgeübt wird, um die Haftung aufrechtzuerhalten. Das ist ein wichtiges Ergebnis z.B. für den Einsatz künstlicher Haftstrukturen für Roboter, die in der Lage sein sollen, Wände empor zu laufen.

II.1.1.4 Einfluss von Feuchtigkeit auf die Haftung der Spinnenart *Philodromus dispar* (Araneae, Philodromidae)

Spinnen besitzen, ähnlich wie Geckos und viele Insekten, haarige Haftstrukturen an ihren Tarsen. Im Gegensatz zu Insekten geht man bei Spinnen jedoch davon aus, dass es sich um ein trockenes Haftsystem handelt, wie dies auch beim Gecko der Fall ist, also kein Haftsekret die Haftung unterstützt. Für den Gecko wurde gezeigt, dass die für die Haftung auf verschiedenen Oberflächen nötige Kraft durch die molekularen van-der-Waals-

Kräfte erreicht wird. Für Spinnen steht dieser Nachweis noch aus. Ein zusätzlicher Faktor, der bei der Haftung von Tieren eine Rolle spielen kann, ist Umgebungsfeuchtigkeit, die sich auf dem Substrat als Wasserfilm niederschlägt. Der Einfluss eines solchen Flüssigkeitsfilms auf die Haftung wurde bereits für den Gecko beschrieben, sowohl auf der Ebene des gesamten Organismus als auch auf der Ebene der einzelnen Hafthärchen (Setae). Hierbei wirken Kohäsionskräfte des Wassers zusätzlich zu den van-der-Waals-Kräften. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass das Wasser auch die Materialeigenschaften der Hafthaare von Geckos verändern kann.

Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Hafteigenschaften der Spinne *Philodromus dispar* wurde in einer Studie von uns untersucht. Die Haftkissen (Scopulae) dieser Spinnenart ähneln denen von Geckos, da sie auch aus sich verzweigenden, hierarchisch aufgebauten Strukturen bestehen, und die Hafthaare an ihren Enden spatelförmig abgeflacht sind (Spatulae) (Abb. 11).

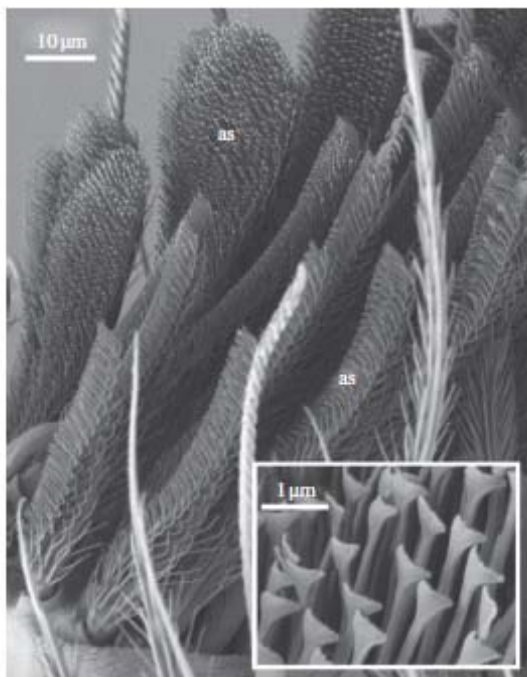


Abbildung 11: Seitliche Ansicht der Hafthaare (as) am Prätarsus von *Philodromus dispar*. Das kleine Bild zeigt die Spatulae eines Hafthaars.

In den Versuchen wurden die Zugkräfte der Spinnen auf einer glatten Oberfläche unter verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten gemessen. Dazu wurde den Tieren ein Haar auf das Prosoma geklebt, und dessen anderes Ende an einem Kraftsensor befestigt. Der Versuchsaufbau befand sich in einer Plexiglas-Box, in deren Inneren die Luftfeuchtigkeit kontrolliert werden konnte (Abb. 12).

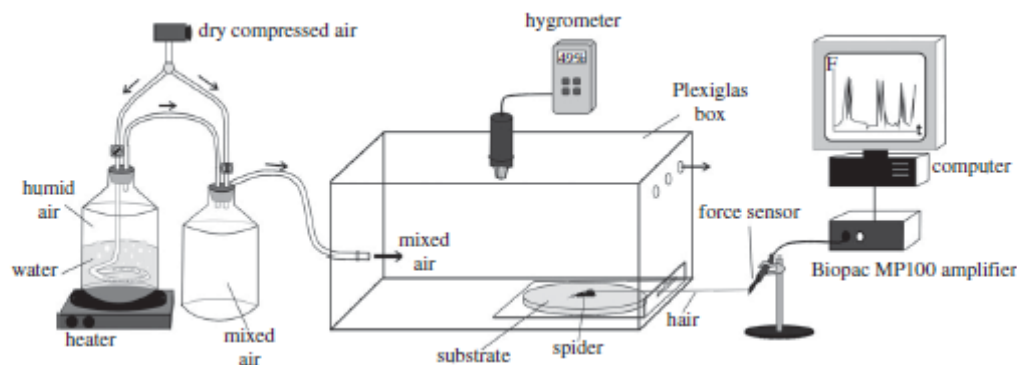


Abbildung 12: Versuchsaufbau für die Zugraftexperimente unter kontrollierten Feuchtigkeitsbedingungen. Die Spinne ist über ein 15-20 cm langes Haar mit einem Kraftsensor verbunden. Die Feuchtigkeit wird kontrolliert durch die Mischung von trockener komprimierter Luft (ca. 15% Feuchtigkeit) mit feuchter Luft. Für eine hohe Luftfeuchtigkeit wurde die Menge an Wasserdampf in der feuchten Luft mittels einer Heizplatte erhöht. Die Temperatur innerhalb der Messkammer wurde permanent kontrolliert, um einen Einfluss der Heizplatte auf die Versuchsbedingungen auszuschließen.

Es wurden Messungen bei relativer Luftfeuchtigkeit von 15%, 50%, 70%, 80% und 99% durchgeführt. Die unterschiedlichen Bedingungen wurden in zufälliger Reihenfolge geändert. Vor jeder neuen Versuchsreihe wurde den Tieren fünf Minuten Zeit zur Akklimatisierung in der Kammer gegeben, bevor der Versuch gestartet wurde. Da die Spinnen nicht mit konstanter Kraft am Haar zogen, wurden zur Auswertung die drei höchsten Punkte der Kraftkurve eines zehnstündigen Laufs verwendet (Abb. 13).

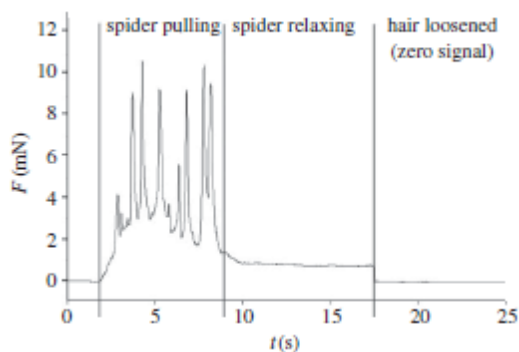


Abbildung 13: Kraftkurve eines Experiments bei relativer Luftfeuchtigkeit von 70%. Die Spitzen der Kurve zeigen die maximale Zugkraft der Spinne in einem Lauf über 10s. Nur die drei höchsten Punkte der Kurve wurden ausgewertet.

Die erhaltenen Kraftwerte bei allen Luftfeuchtigkeitswerten wurden normiert auf die Werte bei 15% Luftfeuchtigkeit (Abb. 14). Die höchste Zugkraft erzielten die Spinnen bei 70% Luftfeuchtigkeit, mit etwa 50% höheren Kräften als bei 15% Feuchtigkeit. Die Kräfte bei 50% und 80% unterschieden sich ebenfalls

signifikant von den Werten bei 15% und 99%. Zwischen den gemessenen Kräften bei 50%, 70% und 80% konnte kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden, wenngleich die Werte bei 70% tendenziell am höchsten waren. Bei 99% Luftfeuchtigkeit wurden nur sehr geringe Zugkräfte gemessen. Unter diesen Bedingungen konnte gelegentliche Wasserkondensation auf der Testoberfläche beobachtet werden, wodurch das Substrat für die Scopulae an den Spinnenfüßen glatt wurde.

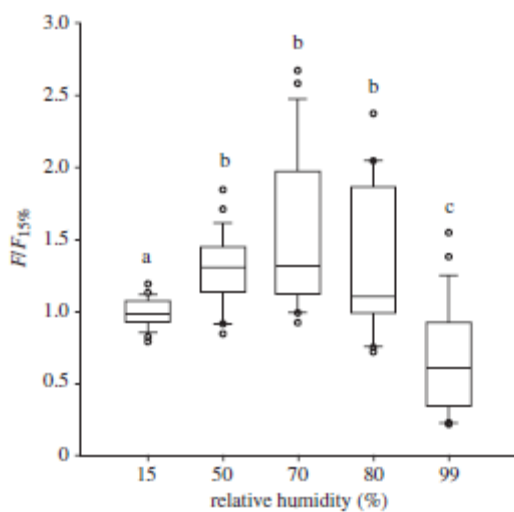


Abbildung 14: Maximale Zugkraft von Spinnen der Art *Philodromus dispar* unter verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen. Die Daten sind normalisiert auf die Werte bei 15% Luftfeuchtigkeit. Die Grenzen der Boxen zeigen das 25%- bzw. 75%-Perzentil, die Linie innerhalb der Boxen zeigt den Median. Die Antennen zeigen das 10%- und 90%-Perzentil, übrige Werte sind durch Kreise markiert. Signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben gezeigt (Tukey Test mit $p < 0,05$).

Unsere Versuche zeigen zum ersten Mal den Effekt verschiedener Luftfeuchtigkeiten auf die Haftfähigkeit von Spinnen. Ähnlich wie beim Gecko haben wir gezeigt, dass die Zugkräfte von *Philodromus dispar* mit ansteigender Luftfeuchtigkeit zunehmen. Ab einem gewissen Wert werden sie jedoch wieder geringer, bis bei extrem hoher Feuchtigkeit (99%) nur noch äußerst schwache Kräfte zu messen sind. Dieser Effekt der Haftreduzierung bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit wurde bislang noch nicht nachgewiesen, da frühere Studien nur den Bereich bis maximal 80% relativer Luftfeuchtigkeit in Betracht zogen.

Die steigenden Haftkräfte bei steigender Luftfeuchtigkeit könnten auch noch durch einen weiteren Effekt zu Stande kommen. Das Material der Hafthaare kann bei höherer Umgebungsfeuchtigkeit Wasser aufnehmen, wodurch die Setae flexibler werden. Umgekehrt trocknen die Setae bei niedrigen Feuchtigkeitswerten aus und die Haft- bzw. Reibungsfähigkeit vermindert sich, wie in einer früheren Studie bereits beschrieben wurde.

Ein besonders dicker Wasserfilm auf dem Substrat bei 99% Luftfeuchtigkeit führt dazu, dass die Kapillarkräfte reduziert werden. Wenn der Wasserspiegel höher ist als die Dicke der Spatulae sinkt der Kapillardruck und der Meniskusfläche wird geringer. Dies kann große Auswirkungen auf Tiere mit haarigen Haftkissen haben, die in einer sehr feuchten Umgebung wie dem tropischen Regenwald leben.

Aufgrund unserer Ergebnisse können wir annehmen, dass *Philodromus dispar* bei einer spezifischen Feuchtigkeit eine maximale Haftkraft aufbringen kann. Tiere mit haarigen Haftstrukturen haben das Material ihrer Hafthärchen möglicherweise so optimiert, dass sie in der von ihnen bewohnten Umgebung eine möglichst gute Haftung mit dem Substrat herstellen können. Dies kann durch die Proteinzusammensetzung des Setae-Materials sowie durch Anpassungen der Spatelform geschehen. Ein ähnlicher Effekt wurde bereits für die Fangnetze cribellater Spinnen gezeigt, die im Gegensatz zu anderen Spinnen keine klebende Flüssigkeit in ihren Netzen verwenden. Auch hier sorgen entsprechende Proteine zusammen mit der Umgebungsfeuchtigkeit für eine erhöhte Adhäsion.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Leistung der haarigen Haftkissen von *Philodromus dispar* stark von der umgebenden Luftfeuchtigkeit abhängig ist. Bei mittleren Feuchtigkeitswerten erreicht die Spinne die maximale Zugkraft, höchstwahrscheinlich aufgrund stärkerer Haftung als bei sehr trockenen oder sehr feuchten Bedingungen. Die Ergebnisse können erklärt werden durch die erhöhten Kapillarkräfte bei mittlerer Feuchtigkeit, oder durch Änderungen der Materialeigenschaften in den Setae und Spatulae durch Wasseraufnahme. Die Ergebnisse zeigen die Grenzen von trockenen Haftsystemen unter unterschiedlichen Umweltbedingungen und sind wichtig für das Verständnis der Biologie dieser Tiere.

II.1.1.5 Verlust von Flüssigkeit eines Insektenfußes beim Anhaften an das Substrat

Das Sekret der Haftpads von Insekten enthält nicht-flüchtige, lipidartige Komponenten. Bei einigen Insekten sind die Sekrete höchstwahrscheinlich Emulsionen aus wasser- und lipidbasierten Komponenten zusammengesetzt.

Das weist darauf hin, dass die Sekrete unterschiedlichen mechanischen Strategien bei der Kontaktformation dienen. Bei der Flüssigkeit der Haftkissen von Käfern wurde vor kurzem entdeckt, dass sie sich wie eine hochviskoses Fluid verhält (ca. einhundert Mal viskoser als Wasser). Neben der hohen Viskosität hat die Käferflüssigkeit eine verringerte Verdunstungsrate, was eine entscheidende Eigenschaft von Tröpfchen in Mikrometergröße ist. Dadurch ist eine robuste Haftung bei verschiedensten Bedingungen gewährleistet. Während der Fortbewegung ist kein spezifisches, komplexes Flüssigkeitsverhalten erforderlich. Das Sekret der Haftkissen von Insekten bildet Kapillarbrücken zwischen den Setae und dem Substrat, was die Kontaktfläche und damit die Haftungs- und Reibungskräfte vergrößert. Ein zusätzlicher Mechanismus verhindert, dass die Insekten auf glatten Oberflächen ausrutschen. Dieser wird durch nicht-newtonsche Eigenschaften der Flüssigkeit unterstützt.

In einer Reihe von Experimenten wurde gezeigt, dass die Oberflächenrauheit die Haftung von Insekten stark beeinflusst. Es wurde gezeigt, dass Insekten eine sehr hohe Haftung auf entweder glatten Oberflächen oder solchen mit einer großen Rauheit (höher als 3 μm) zeigen, während die Haftung am geringsten auf Substraten mit einer Rauheit zwischen 0,3 und 3 μm war. Feuchte Haftkissen von Insekten sind effektiver als trockene auf rauen Substraten, da die effektive Kontaktfläche deutlich größer ist, wenn das Haftsekret die Oberflächenunebenheiten bedeckt.

Viele mikrostrukturierte Pflanzenoberflächen verringern die Haftfähigkeit von Insekten. Eine kürzlich vorgeschlagene Hypothese zur Erklärung der reibungsmindernden Eigenschaften von Pflanzensubstraten, die mit mikroskopischen Wachskristallen bedeckt sind, hat die Vermutung nahe gelegt, dass die Mikro- und Nanostrukturen die Haftflüssigkeit absorbieren könnten. Intuitiv ist klar, dass der Flüssigkeitsverlust auf rauen Oberflächen größer sein muss als auf glatten. Es wurde vor kurzem gezeigt, dass Insekten auf porösen Substraten signifikant geringere Kräfte produzieren können, teilweise aufgrund der Flüssigkeitsabsorption aus den Haftkissen durch das poröse Medium. In diesem Fall kann die reduzierte Reibung durch eine Verringerung der Flüssigkeitskontaktfläche erklärt werden, falls die Rate der Flüssigkeitsproduktion geringer ist als die des Flüssigkeitsverlusts. Es bleibt jedoch unklar, wie die Flüssigkeit auf Substraten mit unterschiedlicher Rauheit

und Oberflächenenergie fließt. In dieser Arbeit führten wir numerische Simulationen durch, um das Verhalten der Flüssigkeit auf rauen Substraten während wiederholter Kontaktbildungen zu untersuchen. Die folgenden Fragen wurden gestellt: (i) Ist die Benetzung des rauen Substrats stärker als die des glatten? (ii) Hängt die Menge der Flüssigkeit, die nach dem Laufen über das Substrat auf dem Haftkissen des Insekts verbleibt, von der Dichte der Strukturen auf dem Substrat ab? (iii) Wie beeinflussen das Aspektverhältnis der Oberflächenstrukturen und die Oberflächenenergie (Affinität des Substrats zur Flüssigkeit) des Substrats die Menge des Flüssigkeitsverlusts während wiederholter Kontaktbildung?

Mikroskopische Beobachtung von Flüssigkeitsabdrücken

Um Flüssigkeiten in Kontakt zu visualisieren, untersuchten wir die Fußabdrücke der Haftkissen bei den Fliegen *Episyrphus balteatus* (Diptera, Syrphidae) und *Calliphora vicina* (Diptera, Calliphoridae) mittels Phasenkontrastmikroskopie und Cryo-REM. Die Insektentarsen wurden mit einer feinen Rasierklinge von betäubten Tieren entfernt und auf einen Glasobjektträger überführt. Durch eine leichte Scherbewegung wurde ein Kontakt hergestellt. Die Proben wurden in flüssigem Stickstoff gefroren und in einem Hitachi S-4800 Cryo-REM nach Beschichtung mit Gold-Palladium bei einer Beschleunigungsspannung von 3 kV und einer Temperatur von -120°C betrachtet. Abdrücke auf Substraten mit unterschiedlicher Rauheit wurden mit künstlichen, mikrostrukturierten Polymerproben durchgeführt, die zu Beginn mit einem dünnen Ölfilm bedeckt wurden. Die Abdrücke wurden mit einem Stereomikroskop visualisiert.

Beispiele von Insektenfußabdrücken auf glatten Substraten sind in Abbildung 15 gezeigt. Die Phasenkontrastmikroskopiebilder zeigen, dass Fliegenfußabdrücke ein hexagonales Muster einzelner Flüssigkeitströpfchen haben, die der Verteilung der Haare auf dem Haftkissen entspricht. Die Cryo-REM-Bilder zeigen, dass die Form der Tröpfchen, die nach der Auflösung des Kontakts zwischen Insektenfuß und Substrat auf dem Untergrund verblieben und gefroren wurden, konvex ist. Wenn der Kontakt zwischen Fuß und Substrat erst nach dem Einfrieren gebrochen wurde, sind die gefrorenen Tröpfchen auf dem Substrat konkav. Die konkave Form könnte auftreten, weil der größte Teil

der Flüssigkeit aus dem Kontakt herausgepresst wird, was zu einer meniskusartigen Erscheinung der Flüssigkeit am Rand des Kontakts führt. Falls die Flüssigkeit nicht erneuert wird, verringert sich ihre Menge während einer Serie von Schritten/Abdrücken. Ein solcher Rückgang war auf rauen Oberflächen stärker.

Modell des Flüssigkeitsverlusts

Für eine qualitative Erklärung des Flüssigkeitstransfers von den elastischen Setae auf ein raues Substrat in einer Serie von Abdrücken wurde ein zweidimensionales diskretes Modell vorgeschlagen. Im numerischen Experiment war die Flüssigkeit zunächst nur auf der Oberfläche der Setae. Danach wurde diese Oberfläche mit der Oberfläche des Substrats in Kontakt gebracht. Das System wurde für einige Zeit ins Gleichgewicht gebracht. Anschließend wurden die Oberflächen getrennt. Der Flüssigkeitsanteil, der bei 10 Annäherungs-/Entfernungszyklen auf der elastischen Oberfläche zurückblieb, wurde analysiert. Die Flüssigkeitsverteilung zwischen den beiden interagierenden Oberflächen wird durch zeitabhängige Unterschiede in der Flüssigkeitsdichte beschrieben. Die beiden Oberflächen haben eine unterschiedliche Affinität zu der Flüssigkeit. Das Modell beinhaltet einen Term, der die Flüssigkeitsdichte stabil hält. Die Setae im Modell sind elastisch und können sich an die Substratoberfläche anpassen.

Unser Modell basiert auf einem Standardvorgehen der physikalischen Kinetik. Es beinhaltet zwei Oberflächen in Kontakt mit einer dazwischen liegenden Flüssigkeitsschicht. Die Oberflächen sind auf einem Raster definiert, das in x-Richtung einheitlich ist (Abb. 16).

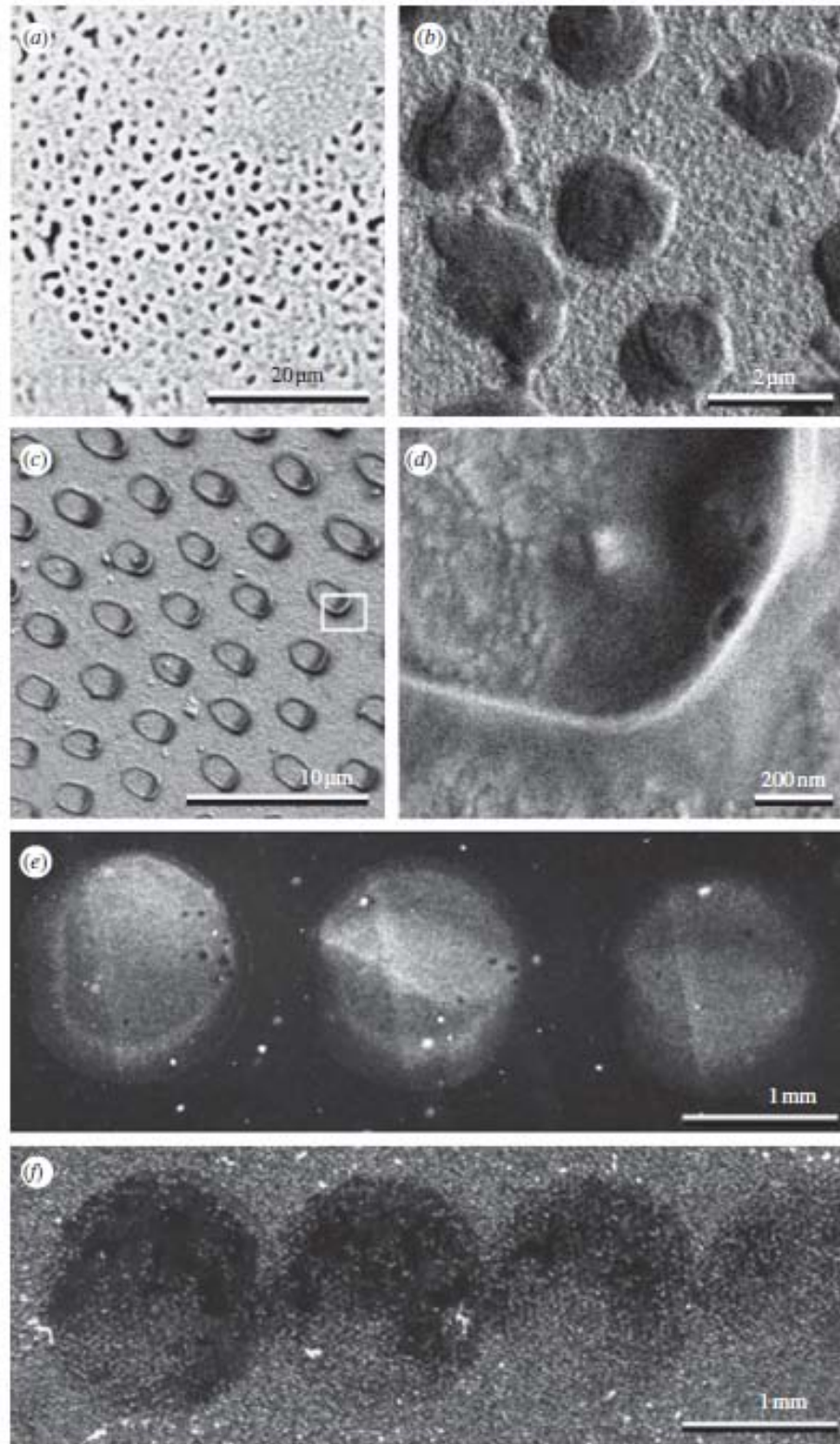


Abbildung 15: (a-d) Die Fußabdrücke von Insekten und (e, f) Flüssigkeitsrückstände von Kontakten, die von ölbedecktem, mikrostrukturiertem, künstlichen Material hergestellt wurden. (a) Der Fußabdruck der Fliege (*Episyrphus baltetus*) im Phasenkontrastmikroskop. (b) Cryo-REM-Aufnahmen des Fliegenfußabdrucks (*Calliphora vicina*). Der Flüssigkeitsrückstand (c, d) nach Einfrieren des Fliegenfußes mit der Flüssigkeitsgrenzfläche, die an das Substrat anhaftet und anschließender Kontaktlösung durch Entfernung des Fußes. Abdruckserien von künstlich hergestellten mikrostrukturierten, ölbedeckten Polyvinylsiloxanproben auf glattem (e) und rauem ($R_a = 1,31 \mu\text{m}$) Substrat. Man beachte die unterschiedliche Menge an Öl auf dem Substrat bei den aufeinanderfolgenden Schritten bei (e) und (f).

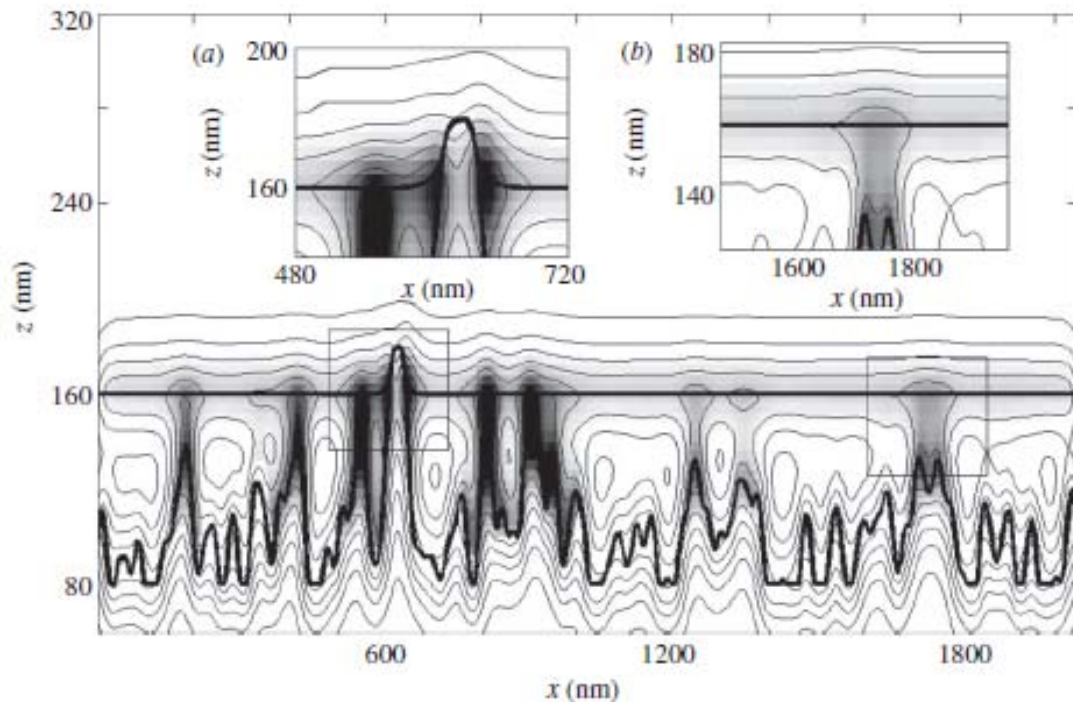


Abbildung 16: Schematisches Konzept des numerischen Experiments. Zwei Potentialminima, die den Oberflächen entsprechen, welche den elastischen Setae (obere Oberfläche) und einem rauhen Substrat (untere Oberfläche) entsprechen, sind durch dicke Linien gezeigt. Potentialverringerung ist durch die dünnen Linien im Höhenlinienplot gezeigt. Die Flüssigkeitsdichte (Dicke der Flüssigkeitsschicht) ist als Graustufenkarte gezeigt. Dunklere Farbe entspricht einer höheren Dichte. Zwei unterschiedliche Meniskustypen sind in den Insets (a) und (b) gezeigt.

Die untere Oberfläche wird als nicht-verformbar angenommen, und repräsentiert eine typisches raues, starres Substrat. Grundsätzlich hat es eine komplexe, sogar fraktale Struktur, die für die Zwecke der vorliegenden Studie mittels Anhäufung von Modi verschiedener Wellenlängen generiert wird. Die obere Oberfläche entspricht dem Haftkissen des Insekts oder einem Teil davon, das normalerweise flexibel ist und in der Lage, sich dem Substratprofil anzupassen. Individuelle Fälle der Verteilung der Flüssigkeitsschicht nahe der oberen Oberfläche sind als einheitliche Dichte entlang der Oberfläche modelliert und als Gaußverteilung senkrecht dazu mit der halben Maximalweite von 50 nm, was der Dicke der Flüssigkeitsschicht entspricht, die aus Abbildung 15b,d abgeschätzt wurde.

Während der Simulation wird ein Flüssigkeitsfluss von der oberen zur unteren Oberfläche untersucht. Zu Beginn befindet sich die Flüssigkeit nur auf der oberen Oberfläche. Dann werden die beiden Oberflächen für 100 ms in Kontakt

gebracht. Diese Zeit wurde als angenäherte Zeit gewählt, die ein einzelner Insektenfuß während des Laufens im Kontakt mit der Oberfläche ist.

Nach der Kontaktzeit von 100 ms werden die Oberflächen getrennt. An jedem Punkt verteilt sich die Flüssigkeit zwischen den beiden Oberflächen neu. Die Menge der Flüssigkeit muss entsprechend des wechselseitigen Verhältnisses lokaler Oberflächenpotentiale an einem gegebenen Punkt geteilt werden. In anderen Worten bleibt die Flüssigkeit auf der Oberfläche mit dem niedrigeren lokalen Potential. Der nächste Zyklus beginnt mit der verbliebenen Flüssigkeit, die auf der oberen Oberfläche homogen verteilt ist und mit einer neuen, trockenen, starren Oberfläche in Kontakt gebracht wird. Dieses Verfahren wird 10 Mal wiederholt. Die obere Oberfläche verliert bei jeder Wiederholung Flüssigkeit. Der Prozess kann durch die verbliebene Flüssigkeit auf der oberen Oberfläche als Anteil der ursprünglichen Flüssigkeitsmenge charakterisiert werden.

Numerische Ergebnisse

Abbildung 16 zeigt eine typische Versuchskonfiguration. Potentialminima der oberen und unteren Oberfläche sind durch dicke Umrisslinien gekennzeichnet. Die Dicht der Flüssigkeit ist als Graustufenkarte abgebildet. Man kann erkennen wie die Flüssigkeit durch ein Gesamtpotential beider Oberflächen neu verteilt wird. Die Flüssigkeit besetzt die Potentialminima und bildet deutlich erkennbare Flüssigkeitsbrücken. Zwei grundlegende Typen solcher Brücken können im Bild einfach unterschieden werden. Ein Typ, welcher um die unmittelbaren Kontakte der beiden Oberflächen auftritt, ist im Inset (a) von Abbildung 16 gezeigt. Bei solchen Kontakten umgibt der Flüssigkeitsmeniskus mit hoher Dichte die sich berührenden Oberflächen. Der zweite Typ bildet sich in Gegenden in enger Umgebung der Oberflächen aus. Er ist in Abbildung 16b gezeigt. In diesem Fall sinken sowohl die Flüssigkeitsdichte und die Flussrate monoton mit steigendem Abstand zwischen den Oberflächen.

Dichte der Strukturen

Behandeln wir nun gesondert die Abhängigkeit der Abflussrate von den chemischen und geometrischen Eigenschaften der starren Oberfläche. Hierfür ist es nützlich, vorübergehend den Zufallsfaktor auszuschließen und eine regelmäßige, harte Oberfläche mit lediglich einer periodischen Komponente anzunehmen. In diesem Fall kann man eine Abhängigkeit des Flüssigkeitsverlusts von der Strukturdichte bestimmen, die der Anzahl der Strukturen pro $1\text{ }\mu\text{m}$ entspricht. Alle Menisken dieses Falls sind vom Typ, der in Abbildung 16a gezeigt ist.

Der Anteil der Flüssigkeit, der während fortlaufender Annäherungs-/Entfernungszyklen auf der oberen Oberfläche verbleibt, ist in Abbildung 17 auf einer logarithmischen Skala gezeigt. Die Kurvenschar zeigt hier eine Abhängigkeit des Flüssigkeitsanteils von der Dicht der Strukturen. Es ist wichtig zu bemerken, dass die Kurven dabei bei hohen Dichten näherungsweise exponentiell verlaufen (linear bei logarithmischer Darstellung), bei niedrigen Dichten aber davon abweichen. Der Anteil der Flüssigkeit, der schließlich auf der oberen Oberfläche nach allen Annäherungs-/Entfernungszyklen bei verschiedenen Strukturdichten verbleibt, ist im Inset in Abbildung 17 zusammengefasst. Der Grund für die gezeigte Abhängigkeit ist, dass der Flüssigkeitsverlust von zwei Faktoren kontrolliert wird: Anzahl der Menisken und Flussweglänge (durchschnittliche Distanz, die die Flüssigkeit während der Kontaktzeit zurückgelegt hat). Beide Faktoren sind proportional zur Strukturdichte. Dabei ist es wichtig zu betonen, dass nach 10 Kontaktzyklen bei einer Strukturdichte von $2\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ etwa 10 Prozent der Flüssigkeit auf der weichen oberen Oberfläche verbleiben.

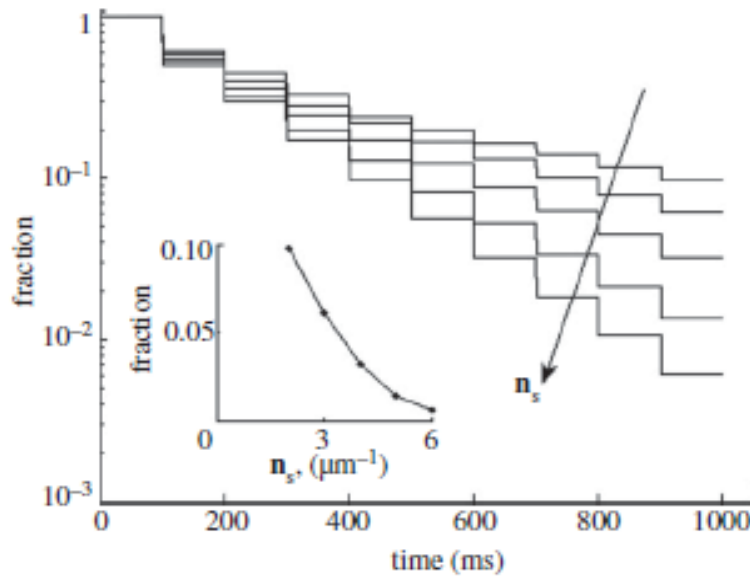


Abbildung 17: Flüssigkeitsanteil, der auf den elastischen Seta (obere Oberfläche) bei wiederholten Annäherungs-/Entfernungssequenzen an das strukturierte Substrat verbleibt. Der Trend der steigenden Strukturdichte ist durch den Pfeil gezeigt. Der Trend des Anteils nach dem letzten Annäherungs-/Entfernungszyklus ist im Inset gezeigt.

Oberflächenenergie

Das chemische Potential des Substrats im Sinne der Affinität zur Flüssigkeit (analog zur Oberflächenenergie) wurde als zweiter Faktor analysiert, welcher die Neuverteilung der Flüssigkeit zwischen den sich berührenden Oberflächen beeinflusst. Das Verhältnis der Affinitäten der Oberflächen wurde als charakteristischer Parameter ($\mu = U_{0,up}/U_{0,down}$) gewählt. Eine Kurvenschar in Abbildung 18 zeigt die Anteilskinetik in logarithmischer Darstellung für verschiedene Werte von μ (bei einer Strukturdichte von $4 \mu\text{m}^{-1}$). Der Anteil der Flüssigkeit der auf der oberen Oberfläche nach 10 Zyklen verbleibt, ist im Inset in Abbildung 18 gezeigt. Man sieht in der Abbildung, dass das Verhältnis der Affinitäten μ einen stärkeren Einfluss auf die Verteilung hat als die Periode. Wenn die obere Struktur eine doppelt so hohe Affinität zur Flüssigkeit hat, verliert sie lediglich 43 Prozent der Flüssigkeit nach 10 Kontaktzyklen.

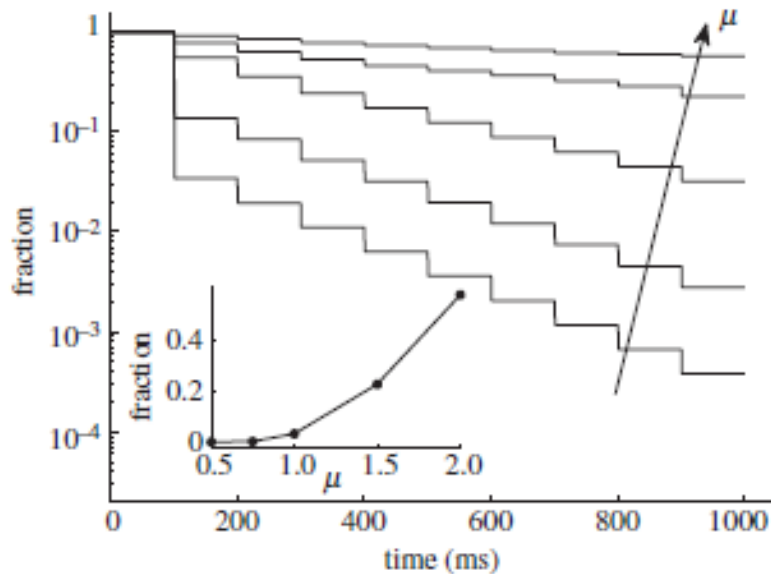


Abbildung 18: Flüssigkeitsanteil, der auf den elastischen Setae (obere Oberfläche) bei wiederholten Annäherungs-/Entfernungssequenzen an das Substrat mit unterschiedlichen Affinitäten zur Flüssigkeit μ verbleibt. Der steigende Trend von μ ist durch den Pfeil markiert. Die Abhängigkeit des Anteils von μ nach dem letzten Annäherungs-/Entfernungszyklus ist im Inset gezeigt.

Rauheitsamplitude

Als nächster Punkt wurde der Einfluss der Rauheitsamplitude der harten unteren Oberfläche auf den Flüssigkeitsanteil, der zurückbleibt, untersucht. Die Schar der kinetischen Kurven bei verschiedenen Rauheitsamplituden ist in Abbildung 19 bei fixierten Parametern gezeigt: $\mu = 1$ und Strukturdichte von $4 \mu\text{m}^{-1}$. Das Inset fasst die Anteilswerte nach 10 Kontaktzyklen bei verschiedenen Rauheitsamplituden zusammen. Man kann direkt in der Abbildung erkennen, dass der verbleibende Flüssigkeitsanteil bei einer zufälligen Oberfläche höher ist als bei einer periodischen. Dafür können zwei Faktoren verantwortlich sein. Die durchschnittliche Anzahl an Menisken ist sowohl für die fraktale als auch für die periodische Oberfläche gleich, aber manche davon sind vom Typ (b) (Abbildung 16b) und haben einen unterschiedlichen Einfluss auf den Flüssigkeitsfluss. Die Flussrate für die entfernten Kontakte ist geringer. Darüber hinaus ist der Abstand zwischen benachbarten Peaks hier nicht gleichmäßig und die mittlere Fließdauer ist bei der zufälligen Oberfläche länger.

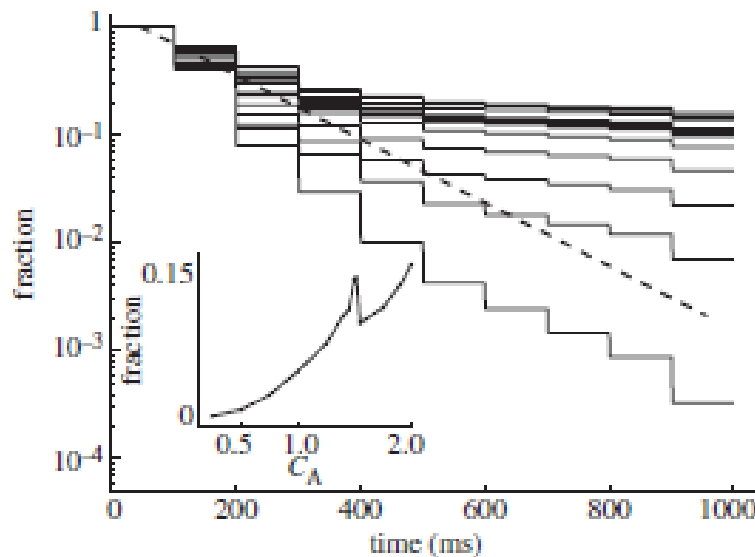


Abbildung 19: Flüssigkeitsanteil, der auf den elastischen Setae (obere Oberfläche) bei wiederholten Annäherungs-/Entfernungssequenzen an das Substrat mit unterschiedlichen effektiven Rauheitsverhältnissen verbleibt. Der erwartete Flüssigkeitsverlust auf einem vollständig glatten Substrat ist durch die gestrichelte Linie gezeigt. Die Abhängigkeit des Anteils von der Rauheitsamplitude nach dem letzten Annäherungs-/Entfernungszyklus ist im Inset dargestellt.

Eine einfache geometrische Sequenz wird für den Kontakt zweier absolut flacher Oberflächen erwartet. Eine solche Sequenz entspricht dem exponentiellen Abfall und ist in Abbildung 19 durch die gestrichelte Linie gezeigt. Die Rate des Flüssigkeitsverlusts ist proportional zur Flüssigkeitsmenge. Daher ist für einige Rauheitsbereiche die Rate der Flüssigkeitsneuverteilung zunächst schneller als der erwartete Exponent, wird aber bei späteren Kontaktzyklen langsamer. Bei kleiner Rauheit ist die anfängliche Verlustrate typischerweise höher als bei einem flachen Kontakt. Da sich eine weiche Oberfläche besser an die glatten Strukturen anpasst, kann die Flüssigkeit die Vertiefungen in der harten Oberfläche besser erreichen. Daneben ist die effektive Fläche der unteren Oberfläche größer als bei der ebenen Oberfläche. Bei einer Rauheitsamplitude von $C_A = 1.5$ ist das Seitenverhältnis der Grundstrukturen nahe der Einheit. Dies verändert den Einfluss der Oberflächenspannung auf die Kinetik und führt zu einer besseren Konservierung der Flüssigkeit auf der oberen Oberfläche. Dieser Effekt manifestiert sich durch ein lokales Maximum im Inset von Abbildung 19. Im Hauptteil der Abbildung entspricht dieses Maximum einer Fläche, die von der Mehrheit der Kurven dicht ausgefüllt wird.

Diskussion

Das Ziel dieser Studie war, die Menge an Flüssigkeit abzuschätzen, die ein Insekt verbraucht, während es auf verschiedenen rauen Oberflächen läuft, da das Vorhandensein von Flüssigkeit zur Hafterhöhung auf rauen Oberflächen beiträgt. Kapillarkräfte sind durch den Dampf-/Kavitationsdruck limitiert. Daher gibt es ein optimales Volumen der Padsekretion, bei dem die Padhaftung ihr Maximum erreicht. Haftsekret, das sich über mehrere Minuten angesammelt hat, überschwemmt die Haftkissen. Im überschwemmten Zustand sind die Kapillarkräfte und die Padhaftung reduziert. Nachdem ein Insekt jedoch mehrere Schritte gemacht hat (sieben Schritte bei einer Schabe auf einem glatten Substrat), erreicht das Volumen der Padsekretion einen stationären Zustand, bei dem die angesammelte Flüssigkeit größtenteils auf das Substrat übertragen wurde und der Flüssigkeitsverlust auf das Substrat durch einen recht langsamen Flüssigkeitseinstrom ausgeglichen wird. Starker Flüssigkeitsverlust auf einem rauen Substrat verursacht eine Reduktion der Haftkräfte. Dies geschieht durch eine Verringerung der Kontaktfläche der Flüssigkeit und damit einer Reduktion der Kapillarkräfte. Die Fähigkeit, auf rauen Substraten zu haften, bietet Insekten einige wichtige Vorteile wie die Erschließung neuer Futterquellen, verringerter Wettbewerb mit anderen Arten und der Flucht vor Parasiten/Räubern, die nicht in der Lage sind, sich auf solchen Substraten zu halten. Der Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Haftung von Insekten wurde in einigen Studien experimentell bestätigt. Im Folgenden wird das Modell, das in dieser Studie verwendet wurde und der Einfluss der Strukturdichte, der Oberflächenenergie und der Rauheitsamplitude auf den Flüssigkeitsverlust basierend auf dem Modell diskutiert.

Modell

Ein vereinfachtes, zweidimensionales Modell der Flüssigkeitsdynamik wurde in dieser Arbeit eingeführt, um den Flüssigkeitsverlust eines Insektenfußes während der Fortbewegung theoretisch zu beschreiben. Anstelle einer präzisen Lösung des Flüssigkeitsflusses im Nichtgleichgewichtszustand, waren wir an der langfristigen Flüssigkeitsneuverteilung zwischen den sich

berührenden Oberflächen interessiert. Die vereinfachte Darstellung der Flüssigkeit beinhaltet einen Term, der die Flüssigkeitsdichte stabil hält. Dem Modell fehlt die Genauigkeit eines exakten physikalischen Modells, aber es erlaubt dank seiner Einfachheit eine semi-quantitative Beschreibung des Systemverhaltens in einem weiten Parameterbereich.

Dichte der Strukturen

In dieser numerischen Studie führt eine höhere Dichte der Substratunregelmäßigkeiten zu einem stärkeren Flüssigkeitsverlust des Haftkissens. Dieser Effekt ist möglicherweise für die verringerte Reibung von Insektenhaftkissen auf kleinen Rauheiten ($0.3 - 1.0 \mu\text{m}$) verantwortlich. Die reduzierte Reibung wurde früher durch die spezifische Geometrie der spatelförmigen Endplatten der Setae von Insekten und deren Dicke erklärt, die in der Lage sind, ausreichenden Kontakt zu großen Oberflächenunebenheiten herzustellen. Interessanterweise haben viele Pflanzenoberflächen, auf denen sich die Insekten nicht festhalten können, eine solche kritische Rauheit aufgrund der Anwesenheit von winzigen Wachskristallen auf ihren Oberflächen.

Vor Kurzem wurde experimentell gezeigt, dass das Verhalten von Flüssigkeitstropfen auf festen, glatten Oberflächen grundlegend anders ist als auf solchen mit Nanoporen. Auf glatten Flächen blieb der Kontaktwinkel (CA) eines Öltropfens über eine gewisse Zeitspanne annähernd gleich, nachdem dieser sich stabilisiert hatte, wohingegen die CA-Zeit-Kurven auf nanoporösen Oberflächen eine schnelle Abnahme des CA während der ersten 20 s nach der Tropfenauftragung zeigten. Dieser Effekt wurde durch die schnelle Absorption der Flüssigkeit durch das poröse Material direkt nach der Auftragung erklärt, und die darauffolgende Stabilisierung des CA durch die „Sättigung“ der porösen Oberfläche durch die absorbierte Flüssigkeit. Diese experimentellen Ergebnisse und Ergebnisse der vorliegenden numerischen Simulation führten uns zu der wichtigen biologischen Schlussfolgerung, dass der Gebrauch feuchter Haftpads für die Haftung während der Fortbewegung auf mikro- und nanorauen Substraten wesentlich kostspieliger ist, vor allem dann, wenn die Flüssigkeit ölig ist.

Oberflächenenergie

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der Flüssigkeitsverlust minimiert werden kann, falls die Oberflächenenergie der Pads (ihre Affinität zur Flüssigkeit) groß genug ist. Diese Schlussfolgerung basiert auf der Existenz einer optimalen Flüssigkeitsmenge zwischen dem Pad und dem Substrat, die die Haftung erhöht. Daher ist die nasse Haftung von der Dauer des Kontakts abhängig, besonders wenn die Flüssigkeit kontinuierlich vom Pad produziert und in die Kontaktzone mit dem Substrat abgegeben wird: eine zu lange andauernde Kontaktzeit führt zu einer verringerten Haftung aufgrund einer zu dicken Flüssigkeitsschicht.

Auf der anderen Seite sollte die Affinität der Pads zur Flüssigkeit nicht zu groß sein; sonst würde das Substrat nicht genügend benetzt werden. In diesem Fall kann man den Einfluss von kapillarer Wasserkondensation und damit der Umgebungsfeuchtigkeit auf das Flüssigkeitsverhalten im Kontakt zwischen Pad und Substrat vermuten. Falls die Affinität des Substrats zur Flüssigkeit sehr hoch ist, kann die Flüssigkeit das Substrat sehr gut benetzen, wird aber dem Pad sehr schnell entzogen. Diese Situation kann zu einer Haftungsverringeringung führen, da die dicke Flüssigkeitsschicht zu einem Aquaplaning-Effekt führt, wie es bereits bei der extrem hydrophilen Oberfläche des Peristoms von fleischfressenden Pflanzen der Gattung *Nepenthes* beobachtet wurde. Die im Vorfeld beobachteten biphasischen Flüssigkeiten von Insekten zeigen, wie eine ausreichende aber durchschnittliche Affinität zur Flüssigkeit für beinahe alle natürlichen Substrate (vermutlich $\mu > 1$) aufrechterhalten werden kann. Da hydrophile Oberflächen eine hohe Affinität zur wasserbasierten Komponente des Padsekrets haben und nicht-polare Oberflächen eine hohe Affinität zur lipidbasierten Komponente, ist die Benetzung des Substrats immer erfüllt, und die Flüssigkeit wird nicht schnell vom Pad absorbiert (wenn die Affinität des Pads zum Padsekret höher ist als die des Substrats).

Rauheitsamplitude

Entsprechend der durchgeführten numerischen Simulationen ist bei kleinen Rauheiten (hohe Dichte und niedrige Amplitude der Substratunebenheiten) ein reichlicher Flüssigkeitsverlust des Haftpads vorhanden. Der Anteil verringert sich mit kleiner werdender Rauheitsamplitude, die Kontaktfläche zwischen Flüssigkeit und Substrat wird jedoch kleiner bei Rauheiten kleiner als eins. Vermutlich werden von den Drüsen des Haftkissens je nach Substrat verschiedene Mengen an Flüssigkeit produziert, aber für diese Hypothese gibt es bislang keinen experimentellen Beweis. Die Flüssigkeitsproduktion bei Bedarf könnte ihren Verlust auf eher glatten Flächen oder solchen mit feiner Rauheit reduzieren. Interessanterweise hat das untersuchte System ein lokales Minimum des Flüssigkeitsverlusts auf rauen Substraten mit einem Seitenverhältnis nahe bei eins. Diese Tatsache sollte in Betracht gezogen werden, wenn nasse Haftung auf Substraten mit verschiedenen Rauheiten vergliche wird.

Schlussfolgerung

Die angewendete numerische Annäherung zur Untersuchung der Flüssigkeitsdynamik während der Kontaktbildung durch Haftkissen von Insekten zeigt, dass ein Anstieg der Periodenlänge des Substrats zu einer Verringerung des Flüssigkeitsverlusts des Pads führt. In anderen Worten nehmen Substrate mit einer kleinen Rauheit die Haftflüssigkeit schneller auf. Erhöhte Affinität eines festen Substrats zur Flüssigkeit führt zu einem Anstieg des Flüssigkeitsverlusts des Pads. Mit einem Anstieg des Aspektverhältnisses der Substratunebenheiten wird der Flüssigkeitsverlust verringert. Die gewonnenen numerischen Resultate stimmen gut mit früheren Beobachtungen von Insekten und experimentellen Ergebnissen zur Flüssigkeitsabsorption auf nanoporösen Substraten überein.

II.1.1.6 Aktivität des Krallenmuskels bei laufenden Käfern der Art *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae) auf verschiedenen Oberflächen

Die Anpassung der Insekten an das terrestrische Leben hat eine Reihe von Anforderungen an die Organismen gestellt, unter anderem die Fähigkeit, sich laufend und kletternd fortzubewegen. Verschiedene Aspekte der Insektenfortbewegung wurden bisher untersucht: Laufmuster in verschiedenen Situationen, sensorische Kontrolle der Beinbewegungen, Innervation der Muskulatur, oder die motorischen Muster verschiedener Beinmuskeln während des Laufens.

Beim horizontalen Laufen besteht ein Schritt aus zwei verschiedenen Phasen. Die erste ist die Stemmphase, während der der Tarsus im Kontakt mit dem Substrat ist und das Bein eine vorwärtsgerichtete Kraft ausübt. Während der zweiten Phase, der Schwingphase, wird das Bein durch die Luft nach vorne bewegt, bis der Fuß für die nächste Stemmphase wieder auf dem Untergrund aufsetzt. Diese beiden Phasen werden von verschiedenen Muskelgruppen gesteuert, welche die einzelnen Beinsegmente bewegen. Die Aktivität einiger dieser Muskeln wurde im Zusammenhang mit dem Laufen der Insekten untersucht. Vor allem die Flexor- und Extensormuskeln der Tibia sowie verschiedene coxale Muskeln waren Untersuchungsobjekt einiger Studien.

Der Ort, an dem die Muskelkraft auf den Untergrund übertragen wird, ist der Tarsus und der Prätarsus. Dort wird mittels spezialisierter Strukturen, die sich am Insektenfuß befinden, der Kontakt mit dem Substrat hergestellt. Unter diesen Strukturen befinden sich die Krallen am Prätarsus, die sich bei fast allen adulten Insekten finden, sowie kissenartige Strukturen, die für Haftung auf verschiedenen Substraten verantwortlich sind.

Da die Aktivität der Muskeln, die den Tarsus und den Prätarsus steuern bislang kaum untersucht wurde, sind die Aktivitätsmuster der Haftstrukturen während verschiedener Verhaltenssituationen wie etwa Laufen oder Festhalten am Substrat in verschiedenen Körperhaltungen weitgehend unbekannt. In einer früheren Studie untersuchten wir den Krallenmuskel zweier Stabheuschreckenarten während die Tiere sich an einer Plattform in horizontaler oder vertikaler Position, oder kopfüber festhielten. Wir zeigten,

dass tonische Muskeleinheiten ständig aktiv waren, unabhängig von der Position der Tiere. Lediglich während der Drehungen der Plattform von einer Position in eine andere war zusätzlich eine phasische Muskeleinheit mit großer Amplitude aktiv. Trotz seiner Wichtigkeit für die Fortbewegung bei der Sicherstellung des Kontakts mit dem Substrat und der Loslösung vom Untergrund wurden bislang nur sehr wenige Untersuchungen dieses Muskels bei laufenden Insekten durchgeführt.

Alle Insekten, die bislang untersucht wurden, besitzen diesen Muskel, der die Krallen einsetzt und aufgrund seiner langen Sehne, die den gesamten Tarsus durchzieht, diesen auch versteift und zum Substrat biegt. Zusammen mit anderen Muskeln ist er daher dafür verantwortlich, die tarsalen und prätersalen Haftstrukturen in Kontakt mit dem Untergrund zu bringen.

Die Rolle der Krallen bei der Anhaftung an verschiedene flache Substrate mit unterschiedlicher Rauheit wurde bereits beim afrikanischen Rosenkäfer *Pachnoda marginata* und der Wanderheuschrecke *Locusta migratoria malinensis* untersucht. Beide Studien weisen auf eine starke Beteiligung der Krallen an der Anhaftung bei gewissen Oberflächenrauheiten hin. Die muskuläre Kontrolle der Krallen auf Substraten mit unterschiedlichen Rauheiten bleibt jedoch unbekannt. Die vorliegende Studie ist ein erster Versuch, die Aktivität des Krallenmuskels während der Fortbewegung auf verschiedenen Substraten darzulegen. Wir untersuchten das zeitliche Aktivitätsmuster des Muskels bei dem Käfer *Pachnoda marginata peregrina* (Coleoptera, Scarabaeidae) während des Laufens auf glatten und rauen Oberflächen. Um den Grad der Aktivität zwischen den verschiedenen Situationen vergleichen zu können, maßen wir auch die Feuerfrequenz der unterschiedlichen registrierten Muskeleinheiten.

Versuchsdurchführung

Zur Registrierung der Muskelaktivität wurden Kupferdrähte mit einem Durchmesser von 50 µm in die Tibia der Tiere nahe des Femur-Tibia-Gelenks eingestochen. Die Elektroden wurden mit einer Wachs-Kolophonium-Mischung an der Tibia fixiert.

Die Tiere wurden anschließend mit einer Klammer an einem höhenverstellbaren Stativ befestigt, sodass sie sich in einem natürlichen Abstand über dem Substrat (Styroporball oder glattes Epoxidharzsubstrat) befanden, und freie Laufbewegungen in die Vorwärtsrichtung ausüben konnten (Abb. 20).

Die Laufbewegungen der Tiere wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet, welche mit dem EMG-Aufnahmesystem elektronisch synchronisiert war.

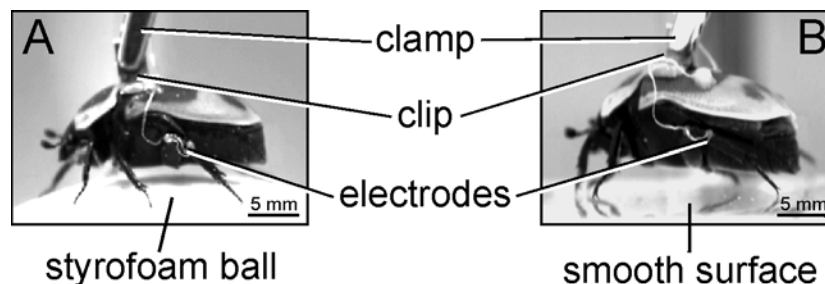


Abbildung 20: Einzelbilder der Videoaufzeichnungen in beiden Laufsituationen. (A) Käfer auf rauem Styroporball. (B) Käfer auf glatter Epoxidharzoberfläche. Die Elektrodendrähte sind an Tibia und Elytren fixiert.

Ergebnisse der EMG-Aufzeichnungen

Bei den Aufzeichnungen der Muskelaktivität konnten wir Muskeleinheiten mit kleiner und großer Amplitude feststellen. Die Einheit mit kleiner Amplitude war beinahe während der gesamten Stemmphase aktiv, während die Einheit mit großer Amplitude hauptsächlich in der ersten Hälfte der Stemmphase aktiv war. Die Aktivität der Muskeleinheiten ist in Phasendiagrammen im Bezug auf die Stemmphase gezeigt (Abb. 21).

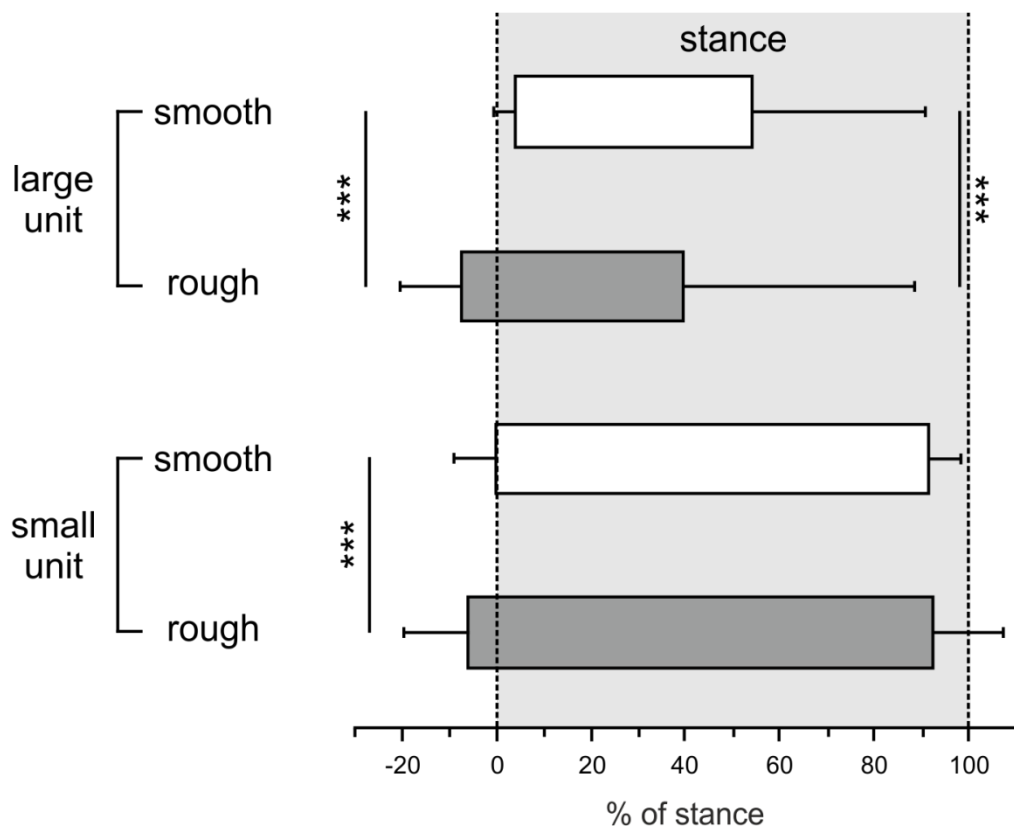


Abbildung 21: Zeitliche Aktivität der beiden Muskeleinheiten des Krallenmuskels auf glatter und rauer Oberfläche im Bezug auf die Stemmphase. Die Sterne zeigen einen signifikanten Unterschied beim Beginn und Ende der Einheiten an.

Wir verglichen die Aktivität des Krallenmuskels in den Hinterbeinen der Käfer, während diese entweder auf einem rauen Styroporball oder auf einer glatten Polymeroberfläche liefen. Das Phasendiagramm zeigt ein relativ ähnliches Aktivitätsmuster für beide Oberflächen. Nichtsdestotrotz enthüllte der Vergleich einige signifikante Unterschiede. Der Aktivität der kleinen Einheit begann auf dem Styroporball früher als auf der glatten Oberfläche ($p < 0,001$), während das Ende ihrer Aktivität nicht unterschiedlich war auf den verschiedenen Oberflächen. Die Einheit mit großer Amplitude begann ihre Aktivität ebenfalls früher auf dem rauen Styroporsubstrat ($p < 0,001$), und beendete sie dort auch früher ($p < 0,001$) als auf dem glatten Untergrund.

Der Vergleich der Feuerfrequenzen offenbarte eine signifikant höhere Frequenz der kleinen Einheit auf dem glatten Substrat als auf dem rauen ($p < 0,001$). Die große Einheit zeigte ein umgekehrtes Verhalten, hier war die Feuerfrequenz auf dem Styropor höher als auf der glatten Fläche ($p < 0,001$) (Abb. 22).

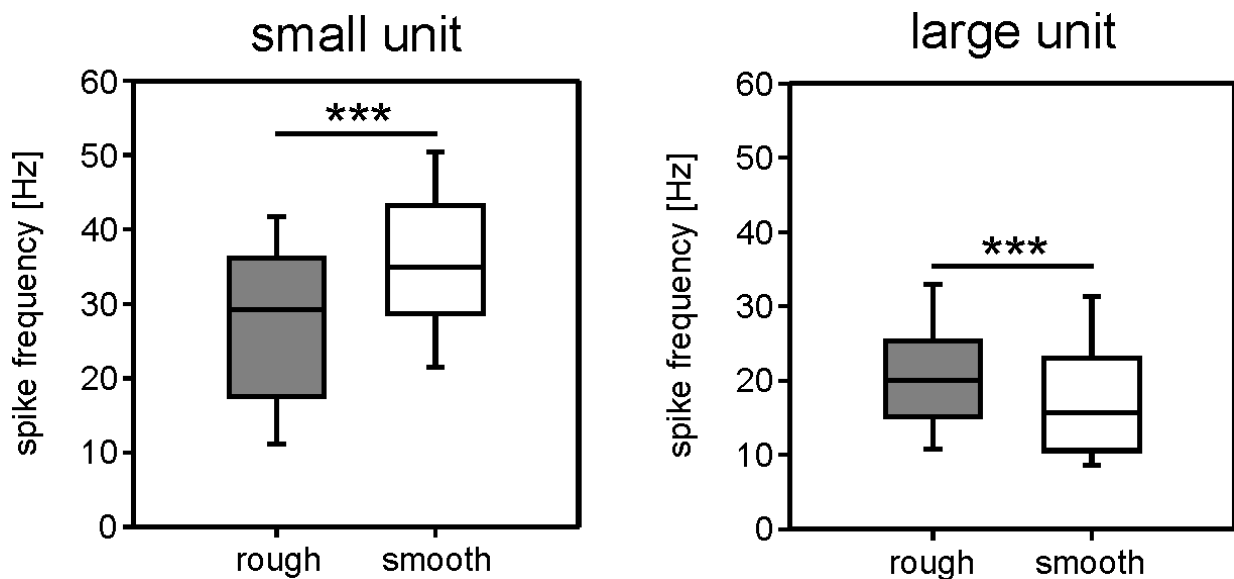


Abbildung 22: Vergleich der Feuerfrequenzen der kleinen und großen Muskeleinheit auf den beiden verschiedenen Substraten. Die kleine Einheit zeigte eine signifikant höhere Frequenz auf der glatten Fläche, während die große Einheit eine höhere Frequenz auf dem Styropor offenbarte. Die Sterne zeigen einen signifikanten Unterschied.

Diskussion

Auf dem Styroporball waren die Tiere problemlos in der Lage, sich fortzubewegen. Das Bewegungsmuster konnte klar in Stemm- und Schwingphasen unterschieden werden. Auf der glatten Fläche hingegen, konnten die Beinbewegungen nicht so deutlich abgegrenzt werden. Die Käfer versuchten zu laufen, aber da die Krallen keinen Widerstand fanden, konnten nur hin und wieder klare Schrittzyklen durchgeführt werden. Die Frage war, ob sich der Muskel, der die Haftstrukturen am Prätarsus kontrolliert (Krallen), in diesen unterschiedlichen Situationen auch unterschiedlich verhält. Auf der einen Seite gab es die Situation, dass sich die Krallen problemlos mit dem Substrat verhaken und dadurch die nötige Reibung für eine Vorwärtsbewegung erzeugen konnten. Auf der anderen Seite versuchten die Krallen sich mit dem Untergrund zu verklammern, waren aber auf dem glatten und steifen Substrat nicht dazu in der Lage. Man könnte annehmen, dass der Krallenmuskel beim Ausrutschen (steifes, glattes Substrat) und beim Verklammern (weiches, strukturiertes Material) ein unterschiedliches Verhalten zeigt.

Unsere Analyse der Muskelaktivität zeigte ein ähnliches zeitliches Aktivitätsmuster des Muskels auf beiden Oberflächen. Wir fanden Muskelaktivität während der Stemmphase und so gut wie keine Aktivität

während der Schwingphase. Auf beiden Oberflächen bestand die Muskelaktivität aus Einheiten mit kleiner und Einheiten mit großer Amplitude. Die Einheit mit kleiner Amplitude war dabei während fast der gesamten Stemmphase aktiv, während die Aktivität der großen Einheit etwa auf die erste Hälfte der Stemmphase beschränkt war. Dies zeigt, dass die Gesamtaktivität des Muskels und das Muster der tarsalen Bewegungen auf beiden Substraten ungefähr gleich waren.

Es gab jedoch Unterschiede beim exakten Beginn und Ende der Muskelaktivität bei den Einheiten. Wir fanden bei beiden Einheiten einen früheren Beginn der Aktivität auf dem Styroporball. Bei der kleinen Einheit konnten wir keinen Unterschied in der Beendigung der Muskelaktivität zwischen den beiden Substraten feststellen. Die Muskeleinheit mit großer Amplitude begann ihre Aktivität ebenfalls auf dem rauen Substrat früher als auf dem glatten. Dabei lag der Aktivitätsbeginn auf dem Styroporball vor dem Beginn der Stemmphase, auf der glatten Fläche danach. Der frühere Muskeleinsatz auf der rauen Fläche kann damit erklärt werden, dass die Krallen dort in der Lage sind, sich mit dem Untergrund zu verhaken und somit eine Fortbewegung problemlos möglich ist. Diese Information wird von den Beinen, die sich in der Stemmphase befinden, über intra- und intersegmentalen Informationsfluss an die Beine in der Schwingphase weitergegeben. Dort wird dann frühzeitig vor dem Ende der Schwingphase eine Muskelaktivität initiiert, um sofort bei Bodenkontakt in der Lage zu sein, die Verklammerung mit dem Substrat und damit eine Fortführung der Laufbewegung zu realisieren. Ein solcher Informationstransfer zwischen verschiedenen Beinen ist ein verbreitetes Prinzip bei Insekten, um Bewegungsmuster den momentan vorhandenen Anforderungen anzupassen. Da eine solche Information von sensorischen Organen auf der glatten Oberfläche fehlt, sind die Beine in der Schwingphase nicht auf ein sofortiges Verklammern mit dem Untergrund vorbereitet und damit beginnt die Muskelaktivität auch erst später als auf dem Styropor. Die Krallen vollführen hier eher eine Rutschbewegung über die Oberfläche, wobei sie Halt suchen. Die Beendigung der Muskelaktivität ist bei der kleinen Einheit sehr ähnlich zwischen rauer (bei 92,5 % der Stemmphase) und glatter Oberfläche (bei 91,8 % der Stemmphase). Die Einheit mit großer Amplitude endet jedoch signifikant später auf dem glatten (bei 54,5 % der Stemmphase) als auf dem rauen (bei

39,3 % der Stemmphase) Substrat. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Krallenbewegung des Verklammerns auf dem rauen Untergrund relativ schnell abgeschlossen ist, während die länger andauernde Aktivität auf der glatten Fläche den länger andauernden Versuch repräsentiert, einen Halt zu finden.

Die Tatsache, dass beide Einheiten ihre Aktivität vor dem Ende der Stemmphase beendeten, ist durch die Vorbereitung für die folgende Schwingphase zu erklären. Durch Beendigung der Aktivität der kleinen Einheit nach ca. 90 % der Stemmphase hat der Muskel seine Spannung und der Tarsus seine Steifigkeit am Ende der Stemmphase verloren und kann dadurch zu Beginn der Schwingphase besser vom Substrat gelöst werden. Dieses Verhalten ist auch von anderen Muskeln, die in der Stemmphase aktiv sind, bekannt, wie zum Beispiel beim posterioren Rotator und dem Adduktor der Coxa, oder dem Krallenmuskel bei der Heuschrecke.

Unsere Analyse zeigte höhere Feuerfrequenzen der kleinen Einheit auf der glatten Oberfläche (34,8 Hz) als auf der rauen (29,2 Hz). Eine höhere Frequenz der kleinen Einheit ist ein Indikator für eine erhöhte Steifigkeit der Tarsalkette. Da die Tiere auf der glatten Fläche nicht die Möglichkeit haben, die Krallen sofort bei Bodenkontakt mit dem Untergrund zu verhaken, müssen sie die ganze Zeit auf eine mögliche Verklammerung vorbereitet sein. Dies wird durch die erhöhte Steifigkeit des gesamten Tarsus gewährleistet. Darüber hinaus ist eine gewisse Steifigkeit des Tarsus unerlässlich für die Aufrechterhaltung der Körperposition. Diese Steifigkeit kann auf der rauen Oberfläche höchstwahrscheinlich in Teilen durch einen vermeintlichen Verklammerungsmechanismus im Inneren des Tarsus erreicht werden, welcher allerdings eine Gegenkraft von außen benötigt, die auf der glatten Fläche nicht vorhanden ist.

Die große Einheit zeigte eine höhere Frequenz auf der rauen (19,9 Hz) als auf der glatten Oberfläche (15,7 Hz). Hier kann der Unterschied damit erklärt werden, dass die Tiere auf dem rauen Substrat sofort eine Verklammerungsbewegung durchführen konnten, was eine schnelle, starke Bewegung erfordert. Auf der glatten Fläche hingegen war dies nicht der Fall, weshalb die Muskeleinheit dort nicht ganz so stark rekrutiert wurde.

Unsere Untersuchungen zum Verhalten des Krallenmuskels bei *Pachnoda marginata peregrina* auf zwei unterschiedlichen Substraten zeigte ein relativ ähnliches Muster. Das bedeutet, dass der Muskel sowohl auf der glatten als auch auf der rauen Oberfläche von der gleichen neuronalen Steuerung kontrolliert. Die Unterschiede bei dem exakten Beginn und Ende der Muskelaktivität kommen durch sensorische Rückmeldungen tarsaler und prätersaler sensorischer Organe zu Stande. Eine solche Anpassung ist auch für Lokomotionsprogramme anderer Beingelenke bekannt. Unsere Arbeit ist allerdings der erste Bericht dieser Art über den Muskel, welcher direkt die prätersalen Haftstrukturen steuert.

II.1.2 Andere biologische Haftsysteme

II.1.2.1. Adhäsion der Fliegenfänger-Falle

Die Klebefalle der südafrikanischen, fleischfressenden (protocarnivoren) Pflanze *Roridula gorgonias* ist dafür bekannt, unterschiedlichste Insekten zu erbeuten, auch solche mit einer beträchtlichen Körpergröße. Die Taupflanze nutzt dafür Drüsenhaare unterschiedlicher Größe, die ein klebriges, viskoelastisches, harziges Sekret absondern. Allerdings haben neuere experimentelle Studien gezeigt, dass dieses Klebesekret der langen, tentakelförmigen Haare nicht so stark ist, wie bisher angenommen. Es stellt sich daher die Frage, warum ist diese Fliegenfänger Falle so hoch wirksam?

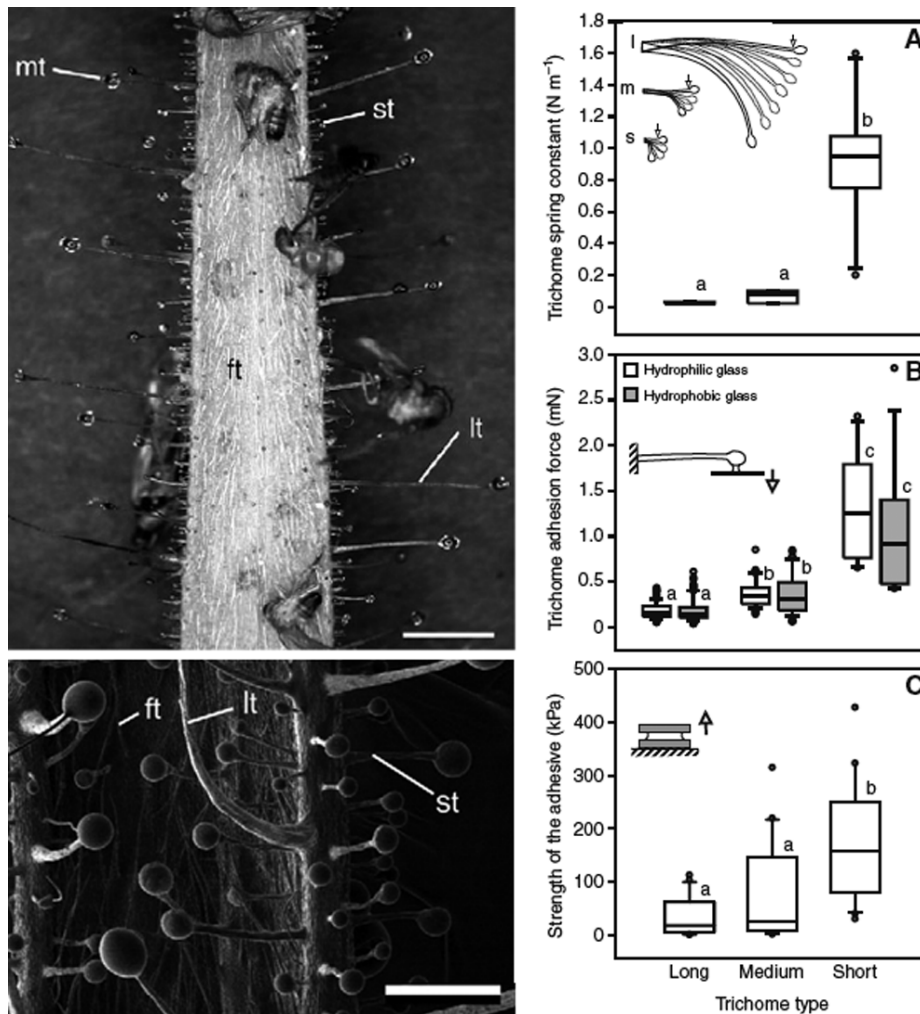


Abbildung 23: LINKS OBEN: *Roridula gorgonias*, Pflanzenast mit einer wechselständigen Blattanordnung (Aufsicht). Messbalken = 3 mm. **LINKS UNTEN:** Kryorasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Blattoberfläche von *R. gorgonias*. Adaxiale Blattseite dicht bedeckt mit nicht-glandulären, filamentösen Haaren, die sich zur Blattspitze hin in kurze kopfförmige Haare zuspitzen. Blatträndern zeigen sich durch die Präparation etwas eingerollt. Messbalken = 500 μm . **RECHTS:** Boxplot der gemessenen Steifigkeit der Klebehaare, Adhäsionskraft der Sekrettropfen und Haftfestigkeit des Sekrets in Abhängigkeit von der Art der Drüsenhaare von *R. Gorgonien*. Die Enden der Boxen geben die 25%ige und 75%ige Perzentile an, mit dem Median (Linie in der Box) sowie die Fehlerbalken, die die 10%igen und 90%igen Perzentile zeigen. Unterschiedliche Kleinbuchstaben weisen auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Haartypen hin. Schema-Zeichnungen in den Diagrammen zeigen die Art des Experiments, die Pfeile die Richtung der Bewegung. (A) Steifigkeit der Klebehaare definiert durch die Federkonstante der erhaltenen Kraft-Weg-Kurve (Kruskal-Wallis-Test / einfaktorielle ANOVA, H_2 , 29 = 22.243 mit α 0.001 und Tukey -Test, $P < 0.05$). Schema-Zeichnungen im Diagramm zeigen das Biegeverhalten der Klebehaare, das mit Hilfe von Videoaufnahmen erhalten wurde. Klebehaartypen: l: lang; m: mittel; s: kurz. (B) Adhäsionskraft einzelner adhesiver Klebstofftropfen auf Glasoberflächen (Kruskal-Wallis-Test / einfaktorielle ANOVA, für hydrophiles Glas: H_2 , 139 = 80.810; für hydrophobes Glas: H_2 , 156 = 54.668, beide mit α 0.001 und Dunn's Test, $p < 0.05$). (C) Sekret-Haftfestigkeit gemessen zwischen zwei hydrophilen Glasoberflächen (Kruskal-Wallis-Test / einfaktorielle ANOVA, H_2 , 29 = 25.668 mit α 0.001 und Tukey -Test, $p < 0.05$). Andruckkraft wurde vor den Abzugskraft-Messungen (1.9 kPa bei 30 s) ausgeübt.

Wir verglichen die Geometrie, die Flexibilität und die Hafteigenschaften des Sekrets der unterschiedlichen Klebehaartypen (Abb. 23). Es wurde die

Morphologie der Pflanze sowie im Speziellen ihre Oberflächen mit lichtmikroskopischen und kryo-rasterelektronenmikroskopischen Methoden analysiert. Die Steifigkeit ihrer Klebehaare und die Hafteigenschaft des Sekrets wurden auf verschiedenen Oberflächen gemessen. Diese Studie zeigt durch die Kombination aus strukturellen und experimentellen Ergebnissen, dass *R. gorgonias* eine dreidimensionale Falle nutzt, die aus drei hierarchischen Funktionsebenen (Pflanze, Blätter und Klebehaare) besteht. Wir konnten aufgrund der Größe drei Typen von Klebehaaren klassifizieren, die eine bestimmte Anordnung auf dem Blatt aufwiesen. Die längsten Klebehaare sind flexibler und besitzen einen weniger starken Klebstoff im Vergleich zu den kürzesten Haaren. Letztere sind 48-mal steifer und ihr Sekret hat eine 9-mal höhere Klebekraft. Unsere Daten unterstützen die Hypothese, dass die kürzesten Haare die Beuteinsekten stark und über einen langen Zeitraum festhalten können, nachdem die längsten Haare als eine erste Einfangstruktur zur ersten Verstrickung (Trapping-Funktion) der Insekten benutzt werden.

II.1.2.2 Haftung der Eier des Apfelwicklers *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) auf unterschiedlichen Substraten: Blattoberflächen verschiedener Apfelsorten

Die erste Generation des Apfelwicklers *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) legt ihre Eier auf Apfelblättern in der Nähe kleiner Früchte ab. Die Wahl der passenden Ablagestelle sowie die richtige Fixierung der Eier werden als essentielle Faktoren für das Überleben der Nachkommen angesehen. In dieser Studie untersuchten wir die Haftung der Apfelwicklereier auf Blattoberflächen verschiedener Apfelsorten des domestizierten Apfels, *Malus domestica*, durch Messungen der Ablösekraft, die erforderlich ist, um die Eier von den Blättern zu entfernen. Da die Oberflächeneigenschaften die Haftung der Eier möglicherweise beeinflussen, wurden morphologische und physikochemische Eigenschaften (Benetzungsfähigkeit, freie Oberflächenenergie) der Blattoberflächen analysiert. Darüberhinaus wurden die Eier mitsamt ihrem Klebstoff, der die Blattoberflächen bedeckt, visualisiert.

Bei vielen Insektenarten, insbesondere bei Lepidopteren, ist die Wahl des Eiablageortes durch die Weibchen ein wesentlicher Faktor für das Überleben der Nachkommen. Die abgelegten Eier müssen an der jeweiligen Wirtspflanze fixiert werden, um die Gefahr der Dislokation und des Abreißens zu vermeiden. Daher wird häufig während der Eiablage ein Klebstoff namens Spumalin von abdominalen Drüsen abgesondert, die mit dem weiblichen Reproduktionssystem assoziiert sind. Damit werden einzelne Eier oder Gruppen von Eiern an die Wirtsoberfläche angeheftet.

Die Spumaline von Insekteneiern sind von verschiedener Konsistenz. Es kann zum Beispiel eine gallertartige Substanz sein, in die die Eier eingebettet sind, oder auch ein harter, trockener Schaum, bekannt als Oothek. Außerdem kann ihre Zusammensetzung stark variieren (z.B. Proteine, Lipide, Kohlenwasserstoffe, Phenole), sogar bei Insekten der gleichen Ordnung, Familie oder Gattung. Dennoch dominieren die Proteine bei den meisten Insektenspumalinen. Sehr wenig ist über die physikalischen Eigenschaften der Eispumaline verschiedener Insektenarten bekannt und darüber, wie stark sie die Eier an die Wirtsoberfläche heften.

Die bevorzugten Eiablageorte der Apfelwicklerweibchen sind gut bekannt. Sie unterscheiden nicht nur zwischen verschiedenen Wirtspflanzenarten, sondern auch zwischen verschiedenen Sorten derselben Art. Darüber hinaus unterscheiden sich die bevorzugten Ablageorte zwischen den einzelnen Generationen entsprechend der Pflanzenphänologie, da Motten 1-3 Generationen pro Jahr durchlaufen. Die Eier der ersten Generation werden auf den Blättern nahe junger Früchte abgelegt, wobei die bevorzugte Blattseite zwischen verschiedenen Apfelsorten unterschiedlich sein kann. Die zweite und dritte Generation hingegen legt die Eier direkt auf den Apfelfrüchten ab. Die Eier werden dann einzeln auf die entsprechende Stelle abgelegt. Sie werden dabei mittels einer adhäsiven Substanz angeheftet, welche die Eier und die umgebende Pflanzenoberfläche bedeckt.

Es gibt bislang keine detaillierten Kenntnisse über das Eispumalin des Apfelwicklers oder über dessen Hafteigenschaften auf den vielfältigen Oberflächen der Wirtspflanzen. In der vorliegenden Studie wurden die Kräfte gemessen, die zur Ablösung der Eier von Ober- und Unterseite der

Blattoberflächen von fünf Sorten des domestizierten Apfels *Malus domestica* nötig sind. Zusätzlich wurden morphologische und physikochemische Eigenschaften (Benetzungsfähigkeit, freie Oberflächenenergie) der Blattoberflächen vergleichend untersucht, um deren Rolle bei der Anhaftung der Eier zu beurteilen. Wir befassten uns mit drei Hauptfragen: (1) Variiert die Stärke der Haftung von Apfelwicklerleiern (*C. pomonella*) auf Blättern verschiedener Apfelsorten? (2) Haften Eier von *C. pomonella* gleich gut auf Ober- und Unterseite derselben Apfelsorte? (3) Welche Oberflächeneigenschaften der Pflanzen beeinflussen die Anhaftung der Eier auf die Apfelblätter hauptsächlich?

Für die Versuche wurden Blätter der Apfelsorten „Elstar“, „Boskoop“, „Golden Delicious“, „Jonica“ und „Topaz“ verwendet. Die Blätter wurden in der Forschungseinrichtung für Gartenbau der Universität Hohenheim gesammelt und randomisiert in einem Umkreis von 10 cm um die Apfelfrüchte ausgewählt. Dort ist die Eiablage der Apfelwicklerweibchen zu erwarten. Beide Blattseiten jeder Sorte wurden mittels (1) Cryo-Rasterelektronenmikroskopie, (2) Kontaktwinkelmessungen und (3) Messungen der Haftkraft der Eier untersucht.

Zu (1): Rasterelektronenmikroskopie

Cryo-Rasterelektronenmikroskopie (Cryo-REM) der Apfelblattoberflächen sowie der Motteneier wurde mit einem Hitachi S-4800 Cryo-REM durchgeführt, welches mit einem Gatan ALTO 2500 Cryo-Präparationssystem ausgestattet war. Frische Proben von ca. 1 cm² Größe beider Blattseiten der fünf Apfelsorten wurden untersucht. Zusätzlich wurden digitale Bilder der Insekteneier auf beiden Blattseiten mit einer Nikon Coolpix 3200 Digitalkamera angefertigt.

Die Oberseite der Blätter von allen fünf Apfelsorten erschien recht glatt und bedeckt von einer amorphen Wachsschicht (Abb. 24). Die epidermalen Zellen waren polygonal geformt und am stärksten konvex bei „Boskoop“. Filamentöse, spiralförmige Trichome waren unregelmäßig verteilt entlang der Blattadern, wobei sie 0,7-10,3 % der Blattfläche bei „Elstar“ bzw. „Jonica“ bedeckten. Einige deutliche kutikuläre Falten traten bei Blättern von sowohl „Topaz“ als

auch „Boskoop“ auf. Weder Stomata noch epikutikulare Wachskristalle wurden auf allen oberen Blattoberflächen der untersuchten Sorten entdeckt.

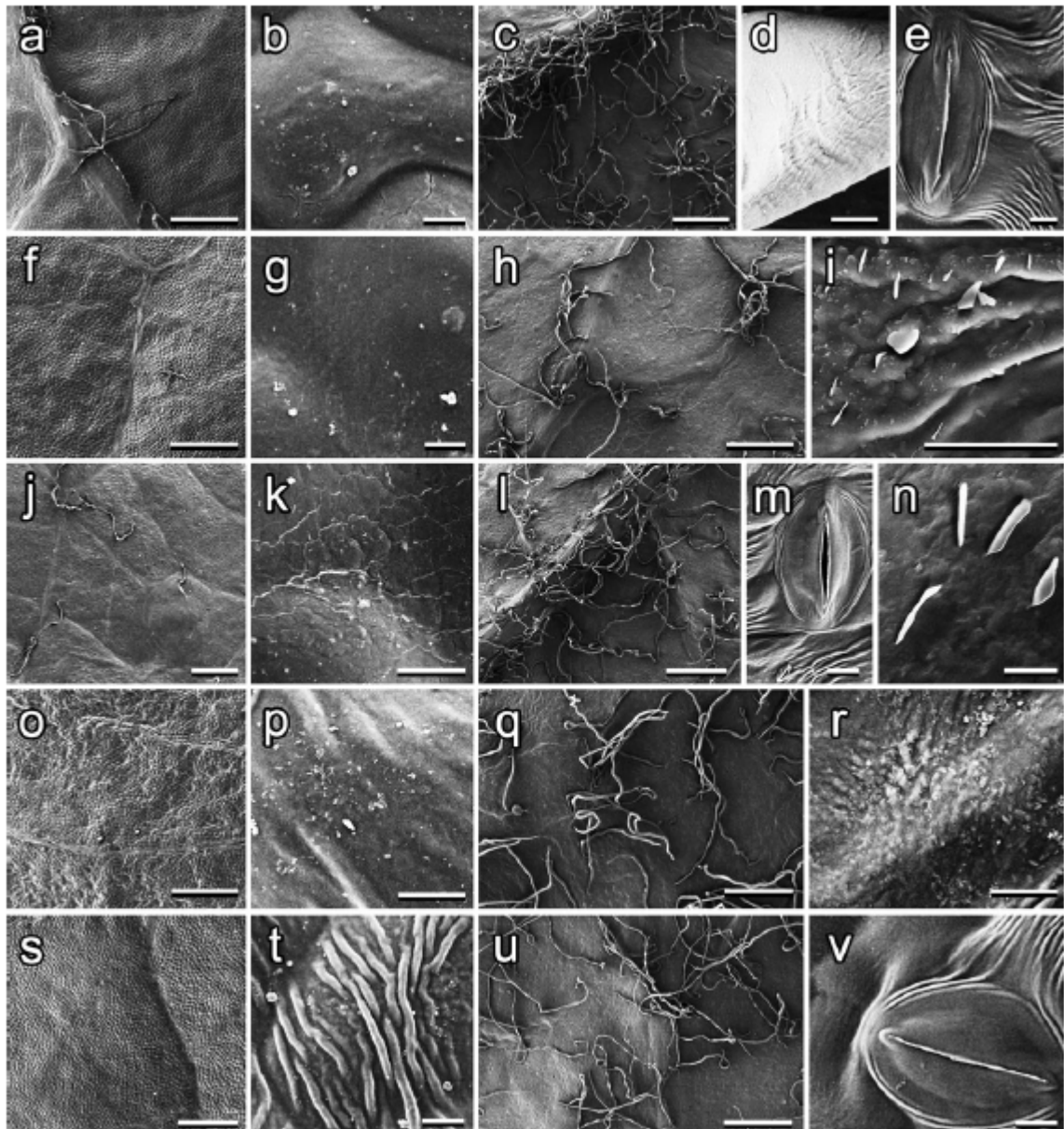


Abbildung 24: Cryo-REM-Aufnahmen der Apfelblattoberflächen verschiedener Sorten. a-e „Boskoop“, f-i „Elstar“, j-n „Golden Delicious“, o-r „Jonica“, s-v „Topaz“. a, b, f, g, j, k, o, p, s, t Oberseite der Blätter, bedeckt von einer amomorphen Wachsschicht. a, j Wenige verdrehte und spiralförmige Trichome, die unregelmäßig entlang der Blattadern verteilt sind. t Kutikuläre Faltungen. c-e, h, i, l-n, q, r, u, v Blattunterseite. c, h, l, q, u Faden- und spiralförmige Trichome auf der gesamten Blattspreite. d Detail der Trichomoberfläche. i, n Epikutikulare kristalline Wachsplättchen. e, m, v Von kutikulären Faltungen umgebene Stomata. Maßstabsleisten: a, c, f, h, j, l, o, q, s, u = 500 μm ; b, d, e, g, i, k, m, p, r, t, v = 5 μm ; n = 1 μm .

Die raueren unteren Blattoberflächen waren filzartig, bedeckt mit filamentösen, spiralförmigen Trichomen, die unregelmäßig über die Blattspreite verteilt waren. Ihre höchste Dichte erreichten sie entlang der Blattadern. Die Apfelsorten

variierten stark hinsichtlich ihrer Trichomgröße (ca. 15-22 µm im Durchmesser) und im Abstand zwischen den Trichomen, der zwischen 108 und 600 µm auf der Blattspreite und zwischen 40 und 83 µm auf den Adern lag. Die Eigenschaften der Trichome auf „Boskoop“ unterschieden sich von denen der anderen Sorten; sie waren dicker, traten in höherer Dichte auf und bedeckten ca. 63 % der Blattfläche. Unversehrte epikutikulare Wachsplättchen wurden nur bei „Elstar“, „Golden Delicious“ und „Topaz“ gefunden. Diese Plättchen unterschieden sich zwischen den Sorten nicht nur in ihrer Größe, sondern auch im Abstand zwischen den einzelnen Plättchen. Darüber hinaus war die Blattunterseite aller Sorten durch deutliche Hauptadern, leicht konvexe epidermale Zellen, zahlreiche Stomata und viele kutikuläre Falten um die Stomata charakterisiert.

Zu (2): Kontaktwinkelmessungen

Es wurden hochsignifikante Unterschiede des Kontaktwinkels dreier Flüssigkeiten zwischen den Apfelsorten gefunden. Alle Oberflächen waren kaum mit Wasser benetzbar und bildeten Kontaktwinkel von 82° bis 120° (Abb. 25). Diese Kontaktwinkel unterschieden sich signifikant von denen auf einer Glasfläche (47°). Es wurden statistische Unterschiede der Kontaktwinkel gefunden (1) zwischen der Blattoberseite von „Boskoop“ und den Blattunterseiten sowohl von „Boskoop“ als auch „Jonica“, sowie beiden Blattseiten von „Topaz“, (2) zwischen der Blattunterseite von „Boskoop“ und allen anderen getesteten Oberflächen, (3) zwischen der Blattoberseite von „Elstar“ und der Blattunterseite sowohl von „Golden Delicious“ als auch von „Jonica“, sowie beiden Blattseiten von „Topaz“ und (4) zwischen der Blattoberseite von „Golden Delicious“ und der Blattunterseite von „Jonica“.

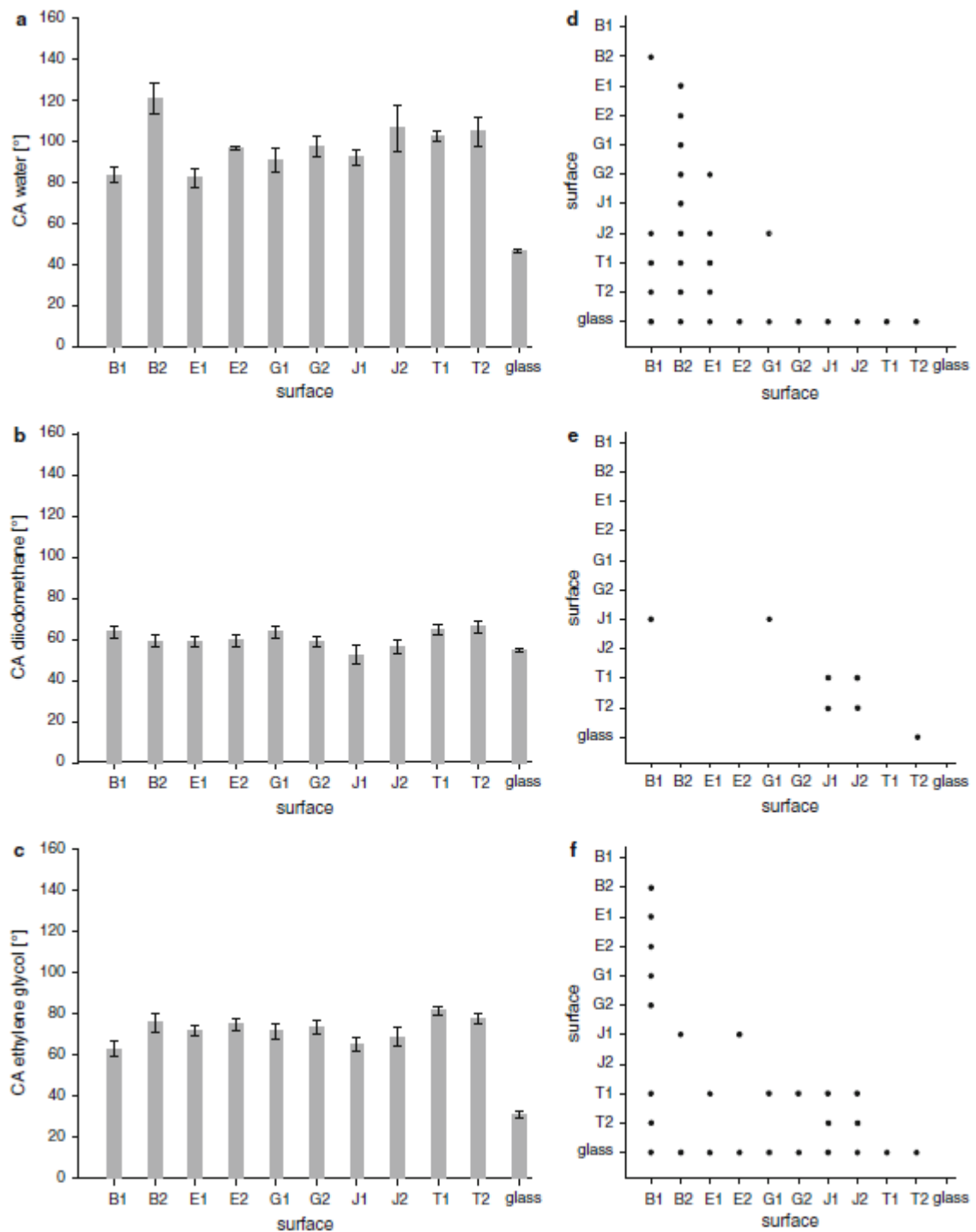


Abbildung 25: Kontaktwinkel (°) (Mittelwerte $\pm$ Stabw) (a, b, c) von Wasser (a, d), Dijodmethan (b, e) und Ethylenglykol (c, f) auf den Testoberflächen. d-f Die Diagramme zeigen die Ergebnisse des paarweisen Vergleichs zwischen den Oberflächen. Die schwarzen Punkte zeigen einen signifikanten Unterschied der Kontaktwinkel zwischen den getesteten Oberflächen. CA Kontaktwinkel, B „Boskoop“, E „Elstar“, G „Golden Delicious“, J „Jonica“, T „Topaz“, 1 Blattoberseite; 2 Blattunterseite; glass saubere Glasoberfläche als Kontrolle

Die nichtpolare Flüssigkeit Dijodmethan benetzte alle Testoberflächen, was sich in Kontaktwinkeln von 55° auf Glas bis 66° auf der Blattunterseite von „Topaz“ widerspiegelt. Es wurden signifikante Unterschiede gefunden (1) zwischen der

Blattoberseite von „Jonica“ und der Blattoberseite von „Boskoop“ und „Golden Delicious“, sowie beiden Blattseiten von „Topaz“, (2) zwischen der Blattunterseite von „Jonica“ und beiden Blattseiten von „Topaz“ und (3) zwischen Glas und der Blattunterseite von „Topaz“.

Die Kontaktwinkel des polaren Ethylenglykols lagen zwischen 63° auf der Blattoberseite von „Boskoop“ und 82° auf der Blattoberseite von „Topaz“ und unterschieden sich signifikant (1) zwischen der Blattoberseite von „Boskoop“ und allen anderen Substraten außer den beiden Blattseiten von „Jonica“, (2) zwischen der Blattoberseite von „Jonica“ und beiden Blattseiten von „Topaz“ und der Blattunterseite von „Boskoop“ und „Elstar“, (3) zwischen der Blattoberseite von „Topaz“ und der Blattoberseite sowohl von „Boskoop“ als auch von „Elstar“, sowie beiden Blattseiten von „Golden Delicious“ und „Jonica“ und (4) zwischen der Blattunterseite von „Topaz“ und der Blattoberseite von „Boskoop“ und beiden Blattseiten von „Jonica“. Der Kontaktwinkel auf Glas (31°) unterschied sich signifikant von denen auf allen Blattoberflächen.

Zu (3): Haftkraft der Eier

Um die Kraft zu messen, die erforderlich ist, die Eier von *C. pomonella* von der Blattoberfläche abzulösen, wurde ein Kraftsensor mit einer Kapazität von 10 g verwendet. Dieser wurde mit einem motorisierten Mikromanipulator kombiniert. Ein ca. 1 cm² großes Stück eines Blattes mit einem Ei wurde frisch ausgeschnitten und mit doppelseitigem Klebeband auf einem Halter befestigt. Eine Schleife des doppelseitigen Klebebands wurde am Kraftsensor befestigt, der mit einer Geschwindigkeit von 100 µm/s hoch und runter bewegt wurde (Abb. 26). Die Klebebandschleife wurde mit einer Kraft von etwa 24 mN in Kontakt mit der Eioberfläche gebracht und daraufhin senkrecht nach oben zurückgefahren bis das Ei vom Blatt abgelöst war. Es wurden mindestens 18 Eier pro Blattoberfläche getestet (insgesamt 267 Eier).

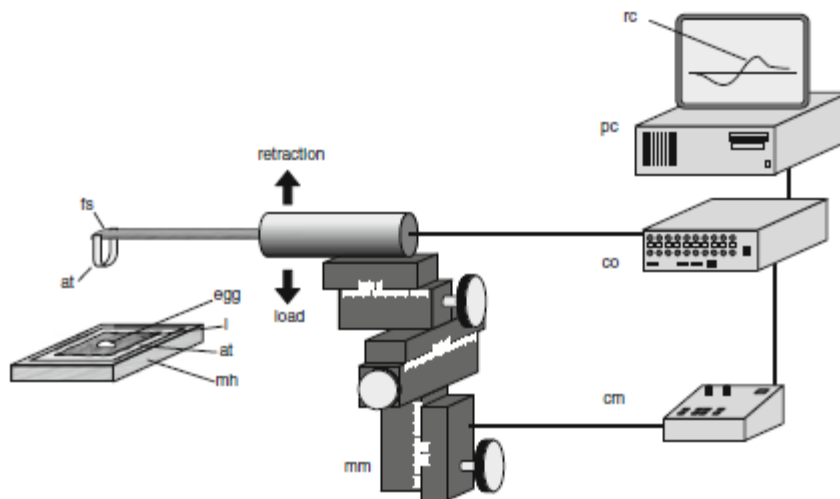


Abbildung 26: Experimenteller Aufbau für die Messung der Haftkräfte einzelner Eier von *C. pomonella* auf den Oberflächen der Apfelblätter. Ein frisch ausgeschnittenes Blattstück (l) der oberen oder unteren Blattseite von fünf Sorten von *Malus domestica*, auf dem ein Ei (egg) abgelegt war, wurde mit doppelseitigem Klebeband (at) auf einem Metallhalter (mh) befestigt. Ein Kraftsensor (fs) mit einer gut haftenden Schleife des Klebebands (at) wurde mittels eines motorisierten Mikromanipulators (mm), der mit einer Steuereinheit (cm) kombiniert war, abwärts bewegt bis ein Kontakt mit dem Ei hergestellt war. Danach wurde der Sensor mit dem anhaftenden Ei senkrecht nach oben bewegt bis sich das Ei von der Blattoberfläche löste. Über die Kontrolleinheit des Sensors (co) wurde das Kraft-Zeit-Signal des Sensors verstärkt, aufgenommen (rc) und in einem Computer (pc) weiterverarbeitet.

Die Ablösekräfte, die benötigt werden, um Eier von *C. pomonella* von den Apfelblattoberflächen zu lösen, unterschieden sich signifikant zwischen den Blattseiten aller fünf untersuchten Apfelsorten (Abb. 27). Die Eier auf der Blattoberseite konnten einfach abgelöst werden, wobei Kräfte zwischen 0,2 und 15,3 mN bei allen Sorten mit einem Gesamtmittelwert von 6,0 mN. Auf der Blattunterseite waren die Eier fester angeheftet (5,0-32,3 mN, Mittelwert von 17,1 mN), was sich in signifikant höheren Ablösekräften widerspiegelte. Die Haftung auf der Blattunterseite von „Golden Delicious“ ($14,0 \pm 5,84$ mN) war signifikant geringer als die auf der Blattunterseite von „Jonica“ ($18,7 \pm 4,13$ mN) und von „Topaz“ ($18,6 \pm 6,29$ mN).

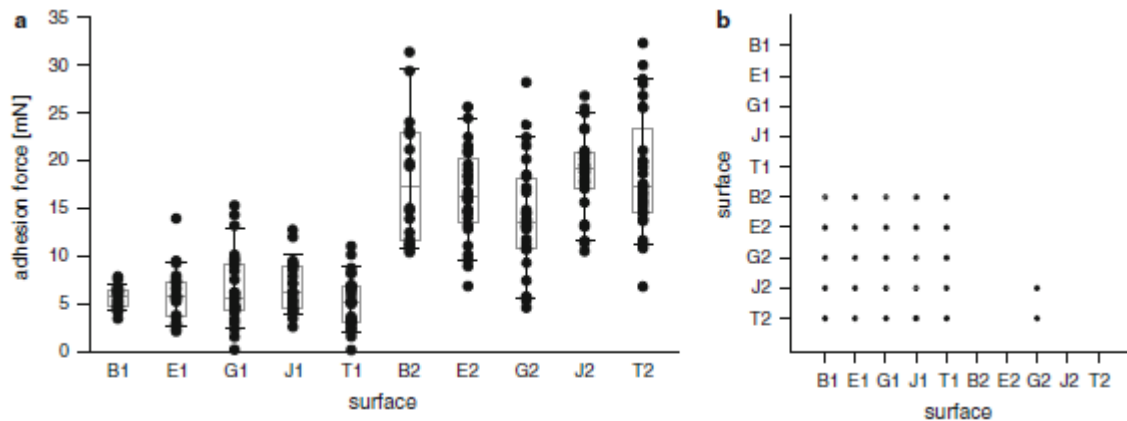


Abbildung 27: a Haftkräfte der Eier von *C. pomonella*, die auf Blattoberflächen verschiedener Apfelsorten gemessen wurden. Die Boxplots beinhalten die Kraftwerte, die auf zehn Blattoberflächen gemessen wurden. **b** Die schwarzen Punkten zeigen einen signifikanten Unterschied der Kraftwerte zwischen den getesteten Oberflächen. *B* „Boskoop“, *E* „Elstar“, *G* „Golden Delicious“, *J* „Jonica“, *T* „Topaz“, *1* „Blattoberseite“, *2* „Blattunterseite“, *glass* „saubere Glasoberfläche als Kontrolle“

Die Anhaftung der Eier war signifikant positiv korreliert mit der relativen Trichom-bedeckten Blattfläche. Es wurde jedoch keine Korrelation gefunden zwischen der Haftkraft der Eier und (1) der Benetzbarkeit beider Blattseiten mit den drei getesteten Flüssigkeiten, (2) der gesamten freien Oberflächenenergie, (3) der polaren Komponente und (4) der dispersen Komponente.

Diskussion

Die Blätter aller Sorten besaßen eine eher glatte Oberseite und eine rauere Unterseite. Die Oberseite war charakterisiert durch eine wellige, hydrophobe Oberfläche ohne Stomata, die mit einer amorphen Wachsschicht und wenigen filamentösen Trichomen entlang der Blattadern bedeckt war. Die Benetzbarkeit der Blattoberseiten variierte signifikant zwischen den Sorten. Diese Tatsache kann durch die unterschiedlichen Eigenschaften der amorphen Wachsschicht je nach Sorte erklärt werden (Dicke und chemische Zusammensetzung), oder durch Unterschiede in der Abtragung der Wachsschicht, wie es bereits für andere Pflanzenarten gezeigt wurde.

Die hydrophobe Unterseite der Blätter war mit filamentösen Trichomen bedeckt und zeigte abhängig von der Sorte beträchtliche Unterschiede im Grad der

Pubeszenz und Pruineszenz. Das Vorhandensein von Trichomen (bei allen Sorten) und Wachskristallen (bei einigen Sorten) könnte für die geringere Benetzbarkeit verglichen mit den oberen Blattseiten verantwortlich sein. Die Blattunterseite von „Boskoop“ zeigte zum Beispiel den größten Kontaktwinkel mit Wasser (120°) und hatte die signifikant höchste Trichomdichte.

Der Klebstoff der Eier bedeckt nach der Abgabe der Weibchen das gesamte Ei und breitet sich über die umgebende Pflanzenoberfläche aus, wobei sogar Trichome, Stomata, Wachskristalle und kutikulare Falten eingebettet werden. Daher kann die Kontaktfläche des Klebstoffs auf der Pflanze beträchtlich groß sein. Man hat den Eindruck, dass der sekretierte Klebstoff zunächst sehr flüssig sein muss und später aushärtet, und dabei das Ei fest an die Pflanzenoberfläche heftet, indem es in die Pflanzenstrukturen eingebettet wird. Ähnliche Annahmen wurden vor Kurzem für den Funktionsmechanismus beim Eiklebstoff des Spargelhähnchens *Crioceris asparagi* gemacht. Wie beim Klebstoff der Käfer benetzt auch jener der Motten sowohl hydrophile als auch hydrophobe Oberflächen. Diese Tatsache deutet möglicherweise auf eine tensidähnliche Natur der Eiklebstoffe bei beiden Insekten hin.

Unsere Daten zu den Haftkräften der Eier von *C. pomonella* auf den Blattoberseiten enthüllten zwei wichtige Erkenntnisse. (1) Die Eier waren auf diesen Oberflächen leichter zu entfernen als jene, die an den Blattunterseiten befestigt waren. Dies bestätigt unsere Beobachtung, dass einige Eier beim Transport der Blätter vom Feld ins Labor leichter von der Blattoberseite abfielen. (2) Die Haftkräfte waren bei den Blattoberseiten aller Sorten gleich groß. Dies bestätigt unser Resultat, dass die Oberseiten der Blätter aller Sorten ähnliche morphologische und physikochemische Eigenschaften besitzen.

Neben den Oberflächeneigenschaften der Pflanzen kann die geringere Haftung der Eier auf den Blattoberseiten auch durch die Abwehrantwort (Bildung von Neoplasma) der Blattrikutula gegen die Eiablage verursacht werden, um die Eier loszuwerden, bevor die Pflanze von den geschlüpften Larven geschädigt werden kann. Eine solche Antwort wurde bereits bei Apfelwicklereiern auf verschiedenen Wirtspflanzen gezeigt. Die Kutikula der Frucht beim Apfel „Red Delicious“, der Pflaume „Red Beaut“, des Pfirsichs „May Crest“ und dreier

Nektarinensorten war leicht dicker im Bereich der Apfelwicklereier als in den Bereichen ohne Eier.

Die vorliegende Studie zeigt, dass bei allen Sorten die Kräfte, die zum Ablösen der Eier nötig waren, auf den Blattunterseiten bis zu dreimal höher waren im Vergleich mit den Blattoberseiten. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die dichte Bedeckung mit Trichomen und Wachskristallen, sowie die Unebenheiten in Form von Stomata und kutikularen Falten auf den Unterseiten zu einer Erhöhung der Kontaktfläche mit dem Eiklebstoff führen (Abb. 28).

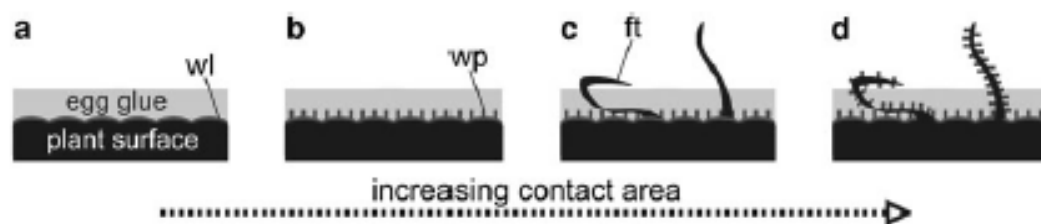


Abbildung 28: Das Diagramm erklärt die Ergebnisse, die bei den Kraftmessungen der Eihaftung auf verschiedenen Oberflächen gewonnen wurden. a Auf der glatten Blattoberseite benetzt der Eiklebstoff die Oberfläche und trifft dabei nur auf wenige Oberflächenstrukturen, was zu einer relativ geringen Haftung des Eis führt. b Wachskristalle (z.B. auf der Blattunterseite bei „Elstar“), die vermutlich stark mit der unterliegenden Wachsschicht verbunden sind, führen zu einem Anstieg der Kontaktfläche zwischen Klebstoff und Substrat. c Die Kombination von Trichomen und Wachskristallen auf der Blattspreite resultiert in einer weiteren Erhöhung der Kontaktfläche und zusätzlicher mechanischer Verklammerung. d Falls auf der Trichomoberfläche weitere Wachskristalle vorhanden sind (wie bei „Boskoop“), wird die Kontaktfläche noch mehr vergrößert und die Verklammerung zwischen Klebstoff und Substrat ist noch stärker als bei (b) und (c). *wl* amorphe Wachsschicht; *wp* epikutikulare Wachskristalle; *ft* filamentöse Trichome

Zusätzlich zu den Oberflächenstrukturen ist die erhöhte Haftung der Eier auf der Blattunterseite auf physikochemische Eigenschaften der Pflanzenoberflächen zurückzuführen (Benetzbarkeit mit Wasser und freie Oberflächenenergie). Die freie Oberflächenenergie zweier Körper in Kontakt beeinflusst ihre Haftung. Bei Festkörpern könnte eine hohe freie Oberflächenenergie die Haftung zwischen den Kontaktpartnern durch Kapillareffekte befördern. Obwohl wir keine signifikanten Unterschiede der freien Oberflächenenergie bei den untersuchten Apfelsorten feststellen konnten, haben wir die höchsten Haftkräfte bei den Blattunterseiten von „Boskoop“, „Topaz“ und „Jonica“ gemessen, welche eine tendenziell höhere freie Oberflächenenergie aufwiesen als die anderen. Im Gegensatz zu den

Blattoberseiten zeigten die Unterseiten signifikante Unterschiede zwischen den Apfelsorten; die niedrigsten Kräfte zeigte dabei „Golden Delicious“. Bei dieser Sorte wurden auch die geringste Trichomdichte und die niedrigste freie Oberflächenenergie aller Blattunterseiten gemessen.

Warum wird dann die Blattoberseite der Apfelpflanzen für die Eiablage bevorzugt?

Obwohl die Eier von *C. pomonella* wesentlich besser auf der haarigen, strukturierten Blattunterseite haften als auf der kahlen Oberseite, findet man häufiger auf der Oberseite Eier. Die Eier müssen dort für 1-3 Wochen verbleiben bis die Larven schlüpfen, abhängig von den Umgebungsbedingungen. Die Weibchen legen die Eier häufig auf sekundäre Blattadern, die eine gewisse Oberflächenrauheit bieten.

Die Vermeidung allzu haariger Blattunterseiten zur Eiablage kann verschiedenerweise erklärt werden. (1) Die eiablegenden Weibchen von *C. pomonella* unterscheiden die Oberflächen nach ihrer Eignung, darauf zu laufen und ihre Füße anzuhaften. Studien aus der jüngsten Vergangenheit haben gezeigt, dass die maximalen Haftkräfte der Füße der adulten Tiere auf glatten Flächen am höchsten war, während sie auf rauen Oberflächen signifikant niedriger war. Daher kann die Rauheit der Blattunterseiten als Abwehrmittel gegen die Eiablage wirken. (2) Die Weibchen legen die Eier an Stellen, an denen die Nachkommen die besten Möglichkeiten zur Haftung und Fortbewegung haben. Es wurde gezeigt, dass die Fortbewegungsgeschwindigkeit frisch geschlüpfter *C. pomonella*-Larven auf glatten Substraten am höher ist als auf rauer Borke oder pubeszenten Blattstielen. Daher unterstützt die Eiablage auf glatten Oberseiten und wenig behaarten Unterseiten die Möglichkeiten der Nachkommen, schnell die Früchte zu erreichen. (3) Die Eiablage auf den Blattoberseiten könnte die Überlebenschancen der Eier verbessern, da potentielle Räuber häufiger auf Blattunterseiten vorkommen.

Die Haftkraft der Eier von *C. pomonella* ist sehr gering verglichen mit derjenigen des Spargelhähnchens *C. asparagi* auf dem Austrieb *A. officinalis*. Die länglichen Käfereier werden senkrecht mit einer kleinen Fläche an die Pflanzenoberfläche geklebt, was sie stark den Wetterbedingungen aussetzt.

Dies erfordert eine starke Haftung. Die flachen, schuppenförmigen Eier von *C. pomonella* hingegen verringern ihre Beanspruchung durch äußere Bedingungen wie Wind, Regen oder Substratbewegungen. Basierend auf unseren Ergebnissen kann man eine unterschiedliche Zusammensetzung oder Konsistenz der Klebstoffe erwarten. Dies wird unterstützt durch ihre unterschiedliche Farbe: milchig weiß beim Apfelwickler und gelb bis grünbraun beim Spargelhähnchen.

Schlussfolgerung

Der Klebstoff der Eier von *C. pomonella* benetzt sowohl hydrophile als auch hydrophobe Oberflächen, was auf tensidähnliche Eigenschaften hindeutet und es ermöglicht, die Eier auf einer breiten Palette von Pflanzenoberflächen anzuheften. Passend dazu hafteten die Eier von *C. pomonella* sowohl auf hydrophilen als auch auf hydrophoben Blattoberflächen gut. Auf den generell raueren Blattunterseiten wurde die höchste Haftkraft gefunden, was sich mit den Beobachtungen zu widersprechen scheint, dass die Eier bevorzugt auf den glatten Blattoberseiten abgelegt werden. Dies ist damit zu begründen, dass die geschlüpften Larven sich auf der Blattunterseite schlechter fortbewegen können und dazu auch die Gefahr durch Räuber dort größer ist. Daher überwiegen die Vorteile für das Überleben der Larven auf der Oberseite die Nachteile durch das schlechtere Anhaften der Eier. Diese Ergebnisse zum Haftvermögen der Eier von Apfelwicklern auf unterschiedlichen Oberflächen bieten einerseits wertvolle Informationen über die Eigenschaften des Klebstoffs, andererseits können sie Anwendung in der Schädlingsbekämpfung finden.

II.1.3 Untersuchung und Charakterisierung des künstlichen Haftmaterials

II.1.3.1 Bio-inspirierte, fibrilläre Haft-Mikrostrukturen

Wir haben die mögliche Ansaugwirkung bei der Haftung der bio-inspirierten, fibrillären Mikrostruktur, die terminal pilzförmige Strukturen besitzen, nachgewiesen (Abb. 29). Da ein reduzierter Umgebungsdruck die Sogwirkung verringern sollte, haben wir die Abzugskräfte des Materials im Vakuum mit den Ergebnissen der Abzugskräfte unter normalen Raumbedingungen verglichen.

Zusätzlich verglichen wurden Ergebnisse einer Vergleichsprobe, die ebenfalls aus dem gleichen Polymer bestand, aber nicht die pilzförmige Struktur hatte, sondern glatt war.

Die Bio- inspirierten, fibrillären Haft-Mikrostrukturen (Gottlieb Binder GmbH, Holzgerlingen, Deutschland) aus Polyvinylsiloxan (PVS) bestanden aus 100 µm hohen, hexagonal-pilzförmigen Mikrofasern, deren terminale Kontaktflächen einen mittleren Durchmesser von ca. 50 µm hatten. Die durchschnittliche Flächendichte der terminalen Kontaktzonen betrug 43%. In dieser Studie wurden sechs der pilzförmigen und sechs glatte PVS-Proben in Kontakt mit einer glatten Glasoberfläche getestet.

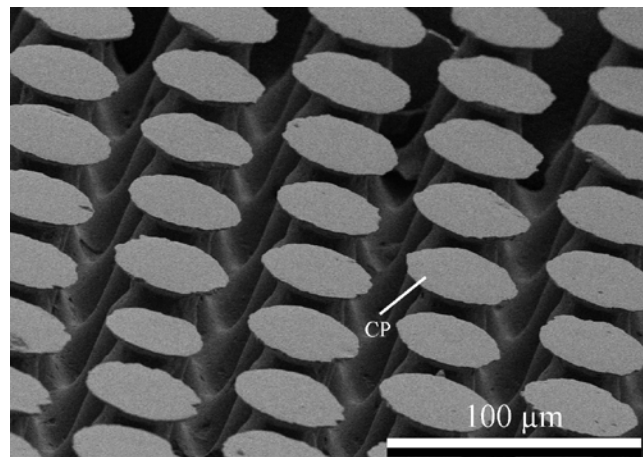


Abbildung 29: Bio-inspirierte, pilzförmig-fibrilläre Haft-Mikrostruktur aus Polyvinylsiloxan. CP, Kontaktfläche.

Adhäsions-Messungen im Vakuum und in Luft

Die Experimente wurden anfangs bei normalem Umgebungsdruck durchgeführt, dann im Vakuum wiederholt und abschließend wieder bei normalem Umgebungsdruck absolviert. Der normale Umgebungsdruck betrug dabei 962 mbar, das Vakuum wurde konstant bei 20 mbar gehalten. Die Umgebungstemperatur lag bei 24 ° C, die relative Luftfeuchtigkeit bei 25%. Die Messungen der Abzugskraft wurden mit einem speziell angefertigten Mikrotribometer (Varenberg et al. 2006; Varenberg und Gorb 2007a) durchgeführt, mit dessen Hilfe die Kontaktkräfte durch sich selbst ausrichtende Probenhalter auf einem Glatt-auf-Glatt-Kontakt-Modell gemessen werden konnten. Jeder Test wurde unmittelbar nach dem Erreichen des entsprechenden Umgebungsdruckes mit einer PVS-Probe von 1 mm Höhe und

2 mm Durchmesser durchgeführt. Die Abzugskraft wurde nach einer ausgeübten Kraft von 60 mN bestimmt bei der Abziehggeschwindigkeit von der Glasoberfläche $100 \mu\text{m s}^{-1}$. Um die Messungen im Vakuum durchführen zu können, wurde das Gerät mit einer Vakuumkammer ummantelt und dieser isolierte Versuchsaufbau dann mit einer Vakuumpumpe V700 (inkl. V850 Controller, Büchi AG, Flawil, Schweiz) verbunden.

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse der Messungen (1) unter normalen Umgebungsbedingungen, (2) im Vakuum und (3) wiederholt unter normalen Umgebungsbedingungen auf einer strukturierten und glatten Probe. Die zweite Studie unter normalen Umgebungsbedingungen wurde durchgeführt, um zu testen, ob das Vakuum des mittleren Testansatzes die Proben veränderte. Unsere Daten bestätigen die zweimal höhere Haftfähigkeit des strukturierten Polymers auf der glatten Glasoberfläche im Vergleich zur Probe mit der glatten Polymeroberfläche. Hingegen konnten unabhängig von der Polymeroberfläche keine signifikanten Unterschiede der Abzugskräfte zwischen dem Versuchsansatz unter normalen Luftdruckverhältnissen und dem, der im Vakuum stattfand, festgestellt werden (Tab. 1). Dieses Ergebnis verringert den Anteil der Sogwirkung auf die gemessene Abzugskraft, da man erwarten würde, dass die Abzugskraft im Vakuum reduziert werden würde, aufgrund verringerter Druckunterschiede zwischen den Lufteinschlüssen unterhalb der pilzförmig verbreiterten Kontaktflächen und der umgebenden Atmosphäre.

$$F_{suc} = \Delta p \cdot A_c \quad (1)$$

F_{suc} ist die Abzugskraft, die aufgrund der Sogwirkung entsteht, wobei $\Delta p = (p_a - p_{hs})$ die Druckdifferenz zwischen dem Umgebungsdruck p_a (962 mbar) und dem Druck in den Hohlräumen der pilzförmigen Polymerkontaktendplatten p_{hs} ist, der an der Grenzfläche zwischen dem Substrat und eben dieser Mikrofaser entsteht; A_c (ca. $1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$) ist die gesamte Kontaktfläche aller Mikrofaseensplatten.

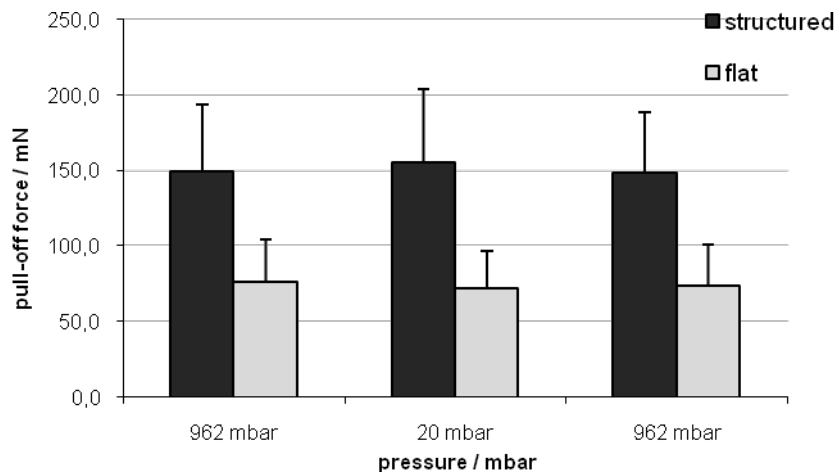


Abbildung 30: Mittlere Abzugskräfte der pilzförmigen, fibrillären Mikrostruktur und der glatten Kontrollprobe auf Glas. Die Experimente wurden bei normalem Umgebungsdruck durchgeführt und dann im Vakuum durchgeführt sowie schließlich erneut bei normalem Umgebungsdruck wiederholt. Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen vom Mittelwert.

Dennoch kann das Vorhandensein einer Sogwirkung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Leitet man die Gleichung (1) nach Δp ab, kann man die Druckdifferenz mittels der Mikrotribometergenauigkeit, die etwa 1 mN ist, berechnen. Mit $F_{suc} = 1$ mN ergibt sich für die Druckdifferenz Δp ein Wert von 8 mbar, was weniger als 1% des normalen Umgebungsdruckes ist.

Voraussetzung für einen Saugnapf-Effekt ist ein bestimmtes Luftvolumen, das sich ausdehnt und das zu einer Unterdruckzone in den Hohlräumen der Kontaktregion führt. Die Mikrostruktur, die in dieser Studie untersucht wurde, hatte glatte und sockelartig, terminal verbreiterte Kontaktflächen. Dadurch sollte das Luftvolumen an der Grenzfläche zwischen den einzelnen Mikrofasern und dem Substrat gleich null sein. Dies scheint den Ergebnissen früherer Studien, die das Kontaktverhalten dieser Mikrostrukturen mittels Weißlichtinterferenz analysierten, zu widersprechen (Varenberg und Gorb 2007). Die Nahaufnahmen einzelner Mikrofasern, die immer wieder erneut vom Substrat getrennt wurden (Abb. 31), zeigten eine fortschreitende Rissbildung. Dieses Risswachstum begann in der Mitte der Kontaktflächen der Fasern (Abb. 31 b). Der Riss breitete sich dann von der Kontaktplattenmitte zum -plattenrand (Abb. 31 c, e) aus, was das Vorhandensein eines Volumens an der Grenzfläche andeutete, bis sich die Kontaktstelle letztlich löste. Dunkle Bereiche zeigen die

wirklichen Kontaktzonen der Polymer-Glas-Grenzfläche, während helle Zonen (Intensität nimmt aufgrund einer Interferenzhöhung zu) Bereiche zeigen, in denen die Ablösung des Polymers von dem Substrat initialisiert wurde.

Tabelle 1: Statistische Signifikanz der Unterschiede von Abzugskräften, die bei verschiedenen Versuchsbedingungen gemessen wurden (siehe Abb. 30).

Probe	verglichene Versuchsbedingungen	signifikante Unterschiede
glatt	vor Vakuum vs. Vakuum	nein ($p = 0.137$) ^a
strukturiert		nein ($p = 0.199$) ^a
glatt	Vakuum vs. nach Vakuum	nein ($p = 0.313$) ^b
strukturiert		nein ($p = 0.131$) ^a
glatt	vor Vakuum vs. nach Vakuum	nein ($p = 0.107$) ^a
strukturiert		nein ($p = 0.597$) ^a

a getestet mit t-Test für gepaarte Stichproben (normalverteilte Daten)

b getestet mit Vorzeichen-Rang-Test (nicht normalverteilte Daten)

Allgemeinen können Interferenzstrahlungen nur dann beobachtet werden, wenn die Weglängenunterschiede kleiner als die Kohärenzlänge der Lichtquelle sind; für Weißlicht ca. 1 μm (Pedrotti und Pedrotti 1993). Aufgrund der Mikrofasernlänge (ca. 100 μm) können keine Interferenzen in dem Raum zwischen den Mikrofasern auftreten und die beobachtete Helligkeit ist nur eine einfache Addition der Intensität des reflektierten Lichts. Im Gegensatz dazu sollte eine erste leichte Ablösung der Mikrofasern von dem Substrat zuerst innerhalb der Kohärenzlänge liegen. Diese Annahme wird durch die Nahaufnahme unterstützt (Abb. 31 f), wo anfänglich eine maximale Intensität gleich nach der Ablösung beobachtet wird. Die Bedingungen für das anfängliche Intensitäts-Maximum in unserem vorherigen Versuchsaufbau (Varenberg und Gorb, 2007) ist ein Wegunterschied von $\lambda/4$. Unter Berücksichtigung, dass λ die mittlere Wellenlänge des Weißlichts (550 nm) ist (Pedrotti und Pedrotti 1993), kann man die Ablösegröße dieses Maximums berechnen, die $h_{\text{max}}=137$ nm ist. Demzufolge sollte die anfänglich leichte Ablösung während des Abziehens der Mikrofasern kleiner als 137 nm sein. Zur Simulation des Ablaufs benutzten wir das Isotherm-Thermodynamische-Modell

$$p \cdot V = \text{const}, \quad (2)$$

wobei p der Druck eines geschlossenen Volumens V bei konstanter Temperatur ist. In unserem Fall war es wichtig, zwei Zustände zu prüfen: den Kontaktzustand und den sich trennenden Kontakt-Zustand der Mikrofasern (Abb. 32). Dies führt zu einer Gleichung

$$p_{att} \cdot V_{att} = p_{det} \cdot V_{det} \quad (3)$$

wobei P_{att} der Druck im Volumen der Grenzflächen V_{att} im Kontaktzustand ist; p_{det} und V_{det} sind der Druck bzw. das Volumen direkt vor dem Ablösen der Kontaktflächen. Wie bereits erwähnt, sind die Kontaktflächen der Mikrofasernelemente flach und von daher sollte das Volumen nominal null sein. Aufgrund der Oberflächenrauigkeit hält sich Luft in jedem kleinen Zwischenraum. Betrachtet man das Volumen der Grenzflächen mittels dieser Rauigkeit indem man eine Oberfläche mit mittleren Rauigkeit R_a als ein periodisches Rechteck-Profil modelliert, kann man den Volumenanteil pro Fläche f_{Ra} durch Extrudieren des Profils berechnen:

$$f_{Ra} = \frac{1}{2} \cdot R_a \quad (4)$$

Unter der Annahme, dass Glassubstrat und PVS-Probe starre Körper sind, können wir das Grenzflächenvolumen wie folgt berechnen:

$$V_{att} = A \cdot (f_{Ra(glass)} + f_{Ra(sample)}) \quad (5)$$

Mit einer durchschnittlichen Rauigkeit von 1 nm für das Glassubstrat und 85 nm für die PVS-Proben (Gorb et al. 2007) sowie A ($1.96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$) als Kontaktfläche einer einzelnen Terminalkontaktplatte einer Faser, haben wir ein Volumen von $V_{att} = 8.43 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3$.

Man geht davon aus, dass die Endplatte und das Substrat den ersten Kontakt an den Spitzen der Unebenheiten (Abb. 32 i) bilden und dieses Grenzflächenvolumen bei Umgebungsdruck berechnet wurde, bevor sich das Kontaktgleichgewicht einstellte (Abb. 32 ii). Wie Gleichung (2) angibt, wird das Grenzflächenvolumen reduziert durch die Anziehungskräfte oder durch die ausgeübte Andruckkraft. Der Druck wird in beiden Fällen ansteigen. Durch den Druckzugewinn kann es zu einer inversen Saugnapf-Wirkung kommen, wenn nämlich die Druckdifferenz Δp negativ wird. Stehen einem die gemessene Werte der Abzugskraft als eine obere Schwelle für solch eine Abstoßkraft zur

Verfügung, kann ein möglicher Überdruck abgeschätzt werden, der mehr als zwei Mal höher als der Umgebungsdruck sein kann.

Dennoch wurde ein solcher Effekt nicht bei der polymeren Mikrostruktur beobachtet, da es tolerant gegenüber Überladung sein soll, ohne, dass es seinen Haftkontakt mit dem Substrat unter reiner Kompression verliert (Varenberg Gorb und 2007). Um das Volumen der terminalen Kontaktzonen vor dem Lösen vom Untergrund berechnen zu können, stellen wir die Gleichung (3) nach V_{det} um und ersetzen den Druck p_{det} mittels der maximalen Druckdifferenz Δp und dem Umgebungsdruck p_a . Man kann leicht ausrechnen, dass sich das Grenzkontaktvolumen bei Ablösung kaum auf 1% erhöht, wenn man dies mit dem Grenzkontaktvolumen im Kontaktzustand vergleicht. Dies scheint verwunderlich, weil (Abb. 31) der beobachtete, ablösungsabhängige Zuwachs der Interferenzintensität einen Zuwachs des Grenzflächenvolumens andeutet. Dieser Widerspruch kann durch das Einbeziehen eines generell vorhandenen, durchschnittlichen Abstands zwischen Probe und Substrat (γ) im Kontaktzustand erklärt werden (Abb. 32 i). Unter diesen Umständen ist γ bezogen auf den Kontaktzustand, bei dem der initiale Kontakt zwischen Probe und Substrat entsteht, die Größe, die als durchschnittliche Rauigkeit R_a der Probe betrachtet werden sollte. Da die Oberflächenrauigkeiten von Probe und Substrat um fast zwei Zehnerpotenzen unterschiedlich sind, können wir das Substrat-Profil als völlig glatt auffassen. Es ist davon auszugehen, dass sich nach der endgültigen Kontaktbildung das Grenzflächenvolumen und der durchschnittliche Abstand (γ_{att}) reduzieren werden (Abb. 32 ii). Betrachtet man eine Verringerung des Grenzflächenvolumens um den Faktor 2, was als gültiger Wert bestimmt wurde, ist der geringere durchschnittliche Abstand γ_{att} vermutlich die Hälfte der Rauigkeit R_a , d.h. etwa 43 nm. Während des Abziehens einer Mikrofaser sollte sich der durchschnittliche Abstand erhöhen und γ_{det} (Abb. 32) sollte durch die leichte Ablösung größer oder gleich γ sein, d.h. etwa 85 nm aufweisen. Vergleicht man den Abstand mit der Ablösehöhe h_{max} des ersten Intensität-Maximums $0 < \gamma_{att} < \gamma_{det} < h_{max}$, können wir die Ergebnisse aus dem Ablösevorgang so interpretieren (Abb. 30), dass kein erkennbarer Zuwachs des Grenzflächenvolumens während der Ablösephase auftritt.

Der Begriff des durchschnittlichen Abstandes geht davon aus, dass es nur einen unvollständigen, partiellen Kontakt im Kontaktzustand (und daher viele durchschnittliche Abstände zwischen den Kontaktflächen) gibt. Dieser durchschnittliche Abstand steht in Zusammenhang mit der eingeschlossenen Luft im Kontaktzonenvolumen. Der durchschnittliche Abstand während der Ablösephase (γ_{det}) korreliert mit der durchschnittlichen Rauigkeit der Probe und wird zweimal höher als die Höhe γ_{att} angenommen. Daher sollte der Übergang des durchschnittlichen Abstandes von γ_{att} zu γ_{det} zu einem klaren an Zuwachs der Intensität ohne merkliche Zunahme des Grenzflächenvolumens im Vergleich zu V_{att} , führen. Weil die Interferenz Intensität (zwischen der Kohärenzlänge) in unserem vorherigen Versuchsaufbau (Varenberg und Gorb, 2007b) eine sinusförmige Verteilung (Bass und Optical Society of America, 1995) hatte, sollte ihr Mittelwert existieren. Dieser ist dann erreicht, wenn der sinusförmige Verlauf der Intensitätsverteilung Null wird. Entweder ist der Zustand bezogen auf einen bestimmten Streckenunterschied oder auf die Bedingung, dass der Streckenunterschied größer als die Kohärenzlänge ist. Da die Graustufen in der Kontaktzone während der Ablösung und die Graustufen in den Zwischenräumen der einzelnen Kontaktendplatten ähnlich sind, ist davon auszugehen, dass γ_{det} in der Nähe des Streckenunterschieds liegt, in der der sinusförmige Verlauf null wird und die Intensität nur durch Addition der Intensitäten entsteht ähnlich wie es im Raum zwischen den Kontaktendplatten vorlag. Dies passt gut zu der Ablösungshöhe des ersten Intensität-Maximums von 137 nm, da der mittlere Abstand mit 85 nm nah an der Hälfte der h_{max} liegt.

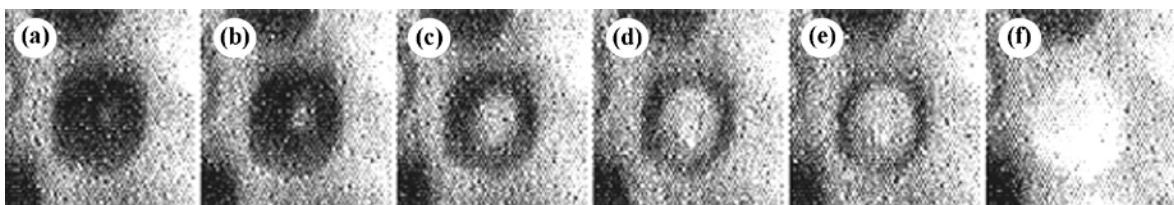


Abbildung 31: Einzelbilder der High-Speed-Video-Aufzeichnung zeigen den Ablösungsverlauf der pilzförmigen Kontaktgeometrie der terminalen Kontaktelement einer einzelnen Microfaser. Der Verlauf wurde mit Hilfe des Weißlicht-Interferometers aufgenommen. Dunkle Bereiche stellen die echten Kontaktzonen zwischen Polymer und Glas dar.

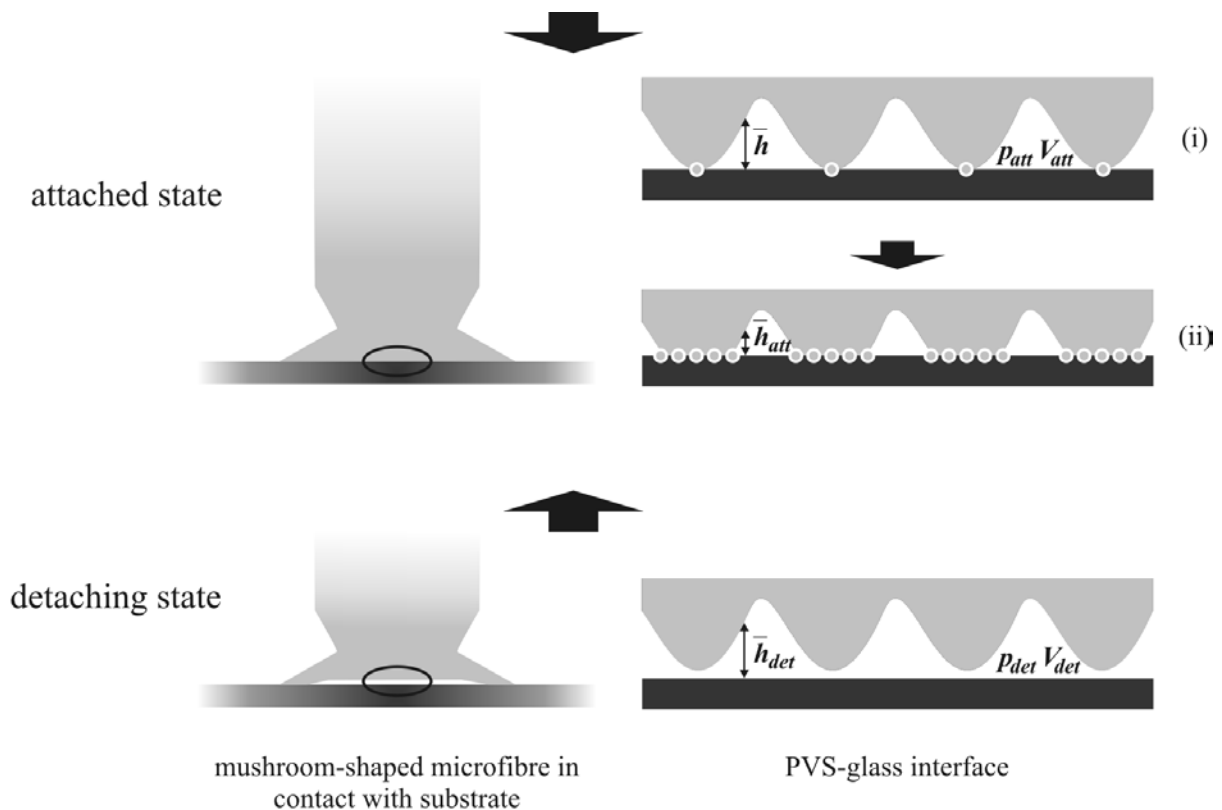


Abbildung 32: Kontaktverhalten der pilzförmigen Geometrie an der Spitze einer Mikrofaser in Kontakt mit Glassubstrat. Linke Seite zeigt das Verhalten der einzelnen Faser. Rechte Seite zeigt das hypothetische Kontaktverhalten bei der PVS-Glas-Grenzfläche, im Kontaktzustand (obere Bilder) und im Ablösezustand (unteres Bild). Die Pfeile zeigen die Richtung der Krafteinwirkung. Weiß umrandete Punkte zeigen die Bereiche mit echtem Kontakt. In dem Kontaktzustand (i), wenn ein erster Kontakt hergestellt ist, ist das Grenzflächenvolumen V_{att} mit dem Druck p_{att} bei einem bestimmten, durchschnittlichen Abstand $\bar{\gamma}$ zwischen den beiden Festkörpern eingeschlossen. In dem Kontaktzustand (ii) mit maximaler Kontaktfläche verkleinert sich der durchschnittliche Abstand auf $\bar{\gamma}_{att}$. Im Ablösezustand ist das Volume V_{det} mit dem Druck p_{det} und einem durchschnittlichen Abstand $\bar{\gamma}_{det}$ eingeschlossen. Da das Substrat eine um fast zwei Zehnerpotenzen kleinere Rauigkeit im Vergleich zur Probe aufweist, ist diese Substratrauigkeit in dieser Abbildung nicht berücksichtigt.

Die verschiedenen Versuchsansätze dieser Studie mit unterschiedlichen Druckverhältnissen lassen darauf schließen, dass sich die verstärkte Haftfähigkeit der bio-inspirierten, pilzförmigen, fibrillären Haft-Mikrostruktur bei trockener Umgebung ausschließlich auf Van-der-Waals-Kräfte sowie auf die Verhinderung der Rissausbreitung durch die Geometrie auf globaler (viele einzelne Kontaktbereiche) und lokaler (pilzförmige Kontaktendplatte) Ebene zurückführen lässt. Mehrere Kontakte wirken als natürlicher Rissstillstand auf der globalen Ebene, was zur Notwendigkeit führt, dass Risse an jeder einzelnen Fibrille dieser Mikrostruktur während der Ablösung entstehen. Die Rissausbreitung auf der lokalen Ebene ist auf die pilzförmige Kontaktgeometrie zurückzuführen, während die Rissausbreitung von der Mitte der

Kontaktendplatte zu dessen Rand die Kontaktstelle bis zur letztendlichen Ablösung, zu stabilisieren scheint.

Da die Haftfähigkeit dieser pilzförmigen, fibrillären Haft-Mikrostruktur nicht durch Vakuum beeinträchtigt wird, könnte dieses Material erfolgreich in Anwendungen, die im Vakuum ablaufen eingesetzt werden wie z. B. in-situ-Mikromanipulatoren sowie in der Raumfahrt.

II.1.3.2. Flüssigkeit als Mittel zur Hafterhöhung eines mikrostrukturierten Elastomers

Die meisten der in letzter Zeit entwickelten fibrillären Haftstrukturen ahmen eine trockene Haftung nach, wobei jedoch zahlreiche Haftsyste me in der Biologie eine Flüssigkeit zur Haftung einsetzen. Die Rolle der Flüssigkeit in derartigen Kontakten ist nicht vollständig verstanden. In der hier vorgestellten Arbeit verwendeten wir als Modellsystem ein Polymer, welches von spezialisierten Haftstrukturen männlicher Käfer aus der Familie der Chrysomelidae inspiriert wurde. Das Material ist ein Polymer aus Polyvinylsiloxan (PVS) und besteht aus zahlreichen pilzkopfförmigen Mikrostrukturen (Abb. 33A). Die Haftung des Materials wurde nach Zugabe von Öl auf die Oberfläche gemessen. Als Kontrolle wurde die Haftung einer unstrukturierten Probe des selben Materials unter Verwendung von Öl gemessen (Abb. 33C).

Material und Methoden

Die Proben mit pilzkopfförmigen Mikrostrukturen wurden aus Polyvinylsiloxan (PVS) hergestellt (Coltène/Whaledent AG, Alstätten, Schweiz).

Die pilzkopfförmigen Mikrostrukturen sind durchschnittlich 64 µm hoch, haben eine Verjüngung und eine Endplatte mit 51 µm Durchmesser. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier benachbarter Fibrillen beträgt 61 µm. Die Mikrostrukturen sind in einem hexagonalen Muster angeordnet. Die Oberfläche der Endplatten der Fibrillen macht 62% der Gesamtfläche der Probe aus (Abb. 33A). Der Durchmesser der gesamten Probe beträgt 1,5 mm.

Das Substrat wurde als direkter Abguss gereinigter Deckgläser (Carl Roth, Karlsruhe, Deutschland) aus Epoxidharz hergestellt (Abb. 33E). Der höchste

Punkt einer zufällig ausgewählten $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ großen Fläche auf dem Substrat wurde mit Hilfe von weißlichtinterferometrischen Aufnahmen (Abb. 33B,D,F) $0,07 \text{ }\mu\text{m}$ über dem Maximum der Höhenwahrscheinlichkeitsverteilung lokalisiert.

Die Probe wurde zunächst auf dem Substrat platziert und ausgerichtet. Während Probe und Substrat im Kontakt waren, wurde die Oberseite der Probe mit einem winzigen Tropfen flüssigen PVS an den Kraftaufnehmer (25 g Kapazität, World Precision Instruments, Sarasota, FL, USA) geklebt. Der Sensor war an einen motorisierten Manipulator (DC3001R, World Precision Instruments, Sarasota, FL, USA) montiert, der eine Probenbewegung entlang drei Achsen erlaubte (x, y, z). Der Manipulator war in der Lage, gleichzeitig mit Be- und Entladung sowie horizontaler Kraftübertragung die Ausrichtung der Probe während deren Bewegung zu gewährleisten. Das Kraftsignal des Sensors wurde mittels eines MP100WSW-Datenerfassungssystems und der Software AcqKnowledge 3.7.0 (Biopac Systems Inc., Goleta, CA, USA) verstärkt, digitalisiert und aufgezeichnet.

Jede Haftungsmessung wurde an einer neuen Stelle auf dem Substrat durchgeführt. Die Beladungsgeschwindigkeit betrug $50 \text{ }\mu\text{m/s}$, die Andruckkraft $124,08 \pm 0,05 \text{ mN}$. Zunächst wurde die Haftung einer trockenen Probe auf einem trockenen Substrat gemessen (10 individuelle Messungen an 10 verschiedenen Stellen). Danach wurde die Probe in Kontakt mit einem Deckglas gebracht, auf dem eine Schicht DTE Öl (ISO VG 46, Mobile, USA) einer effektiven Dicke von $2,1 \text{ }\mu\text{m}$ aufgebracht war. Der Ölfilm wurde hergestellt durch Verteilen eines $3 \text{ }\mu\text{l}$ großen Öltropfens auf einem Deckglas mit einem zweiten Deckglas. Nachdem die PVS-Probe in das Öl getaucht wurde, wurden weitere 10-16 Messungen mit fünf einzelnen Proben auf dem selben Substrat durchgeführt. Die Experimente fanden bei Umgebungsbedingungen statt (23°C , 17% relative Feuchtigkeit).

Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (REM) wurden mit einem Hitachi S-4800 Elektronenmikroskop (Hitachi High-Technologies Corp., Tokyo, Japan) gemacht. Die Oberflächen wurden mit Gold-Palladium beschichtet (8 nm Dicke) und bei 2 kV Beschleunigungsspannung mit dem „lower“ Elektronendetektor betrachtet. 3D-Oberflächenprofile wurden mit einem Weißlichtinterferometer

NewView 6000 (Zygo, Midfield, CT, USA) aufgenommen. Datenanalyse wurde mit Matlab 7.10 (The MathWorks, Natick, MA, USA) durchgeführt.

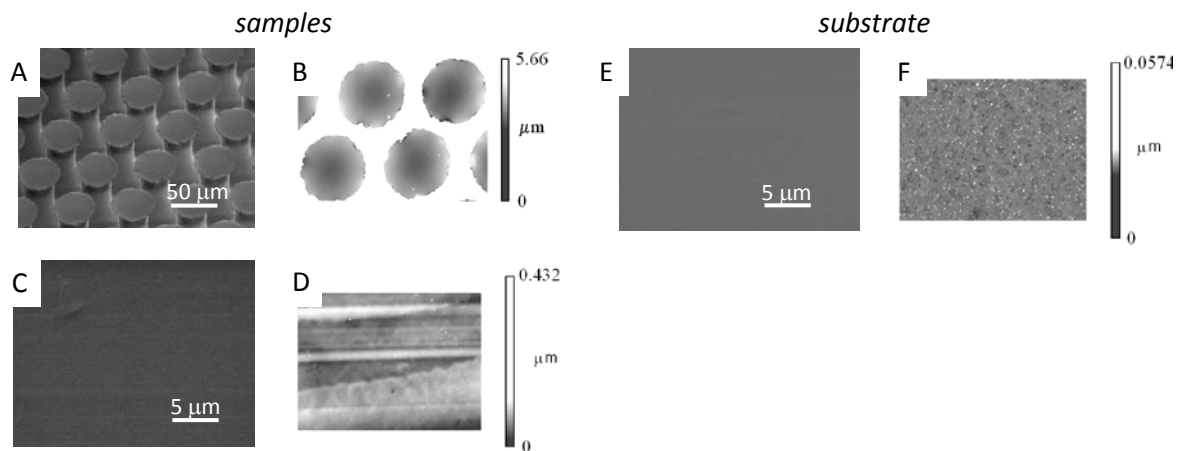


Abbildung 33: REM-Bilder (A, C, E) und Oberflächenprofile (B, D, F) der mikrostrukturierten (A, B) und glatten (C, D) Proben, und des Substrats (E, F).

Ergebnisse und Diskussion

Glatte Probe. Die Haftung der glatten Proben auf dem glatten Substrat wurde als Referenz gemessen. Es wurde eine Reihe von zehn einzelnen Haftversuchen mit fünf glatten PVS-Proben durchgeführt (erste zehn Messungen in Abb. 34A). Unter trockenen Bedingungen lag die mittlere Haftkraft der glatten Proben bei $F_s = 22,70 \pm 0,98$ mN (MW $\pm$ 99% SE) (Abb. 34A). Die Haftung änderte sich nicht während der Versuche.

Danach wurde die glatte Probe mit dem Ölfilm in Kontakt gebracht, der auf einem Deckglas aufgetragen war. Das Öl wurde aus der Kontaktfläche verdrängt, so dass nach der Trennung des Kontakts nur eine kleine Menge auf der Oberfläche der PVS-Probe verblieb. Nachdem das Öl auf der Probe aufgetragen war, wurden aufeinanderfolgende Kraftmessungen auf den selben Substratstellen durchgeführt, auf denen die Haftung der trockenen Proben gemessen worden war. Direkt nach der Öl-Applikation sank die Haftung auf die Hälfte und erholte sich dann langsam bis zum Niveau der trockenen Haftung (Abb. 34A). Die geringere Haftkraft in Anwesenheit der Flüssigkeit bedeutet, dass die Kapillarkräfte bei einer glatten Probe mit einem dicken Flüssigkeitsfilm schwächer sind als die van-der-Waals-Kräfte im Falle der trockenen Haftung.

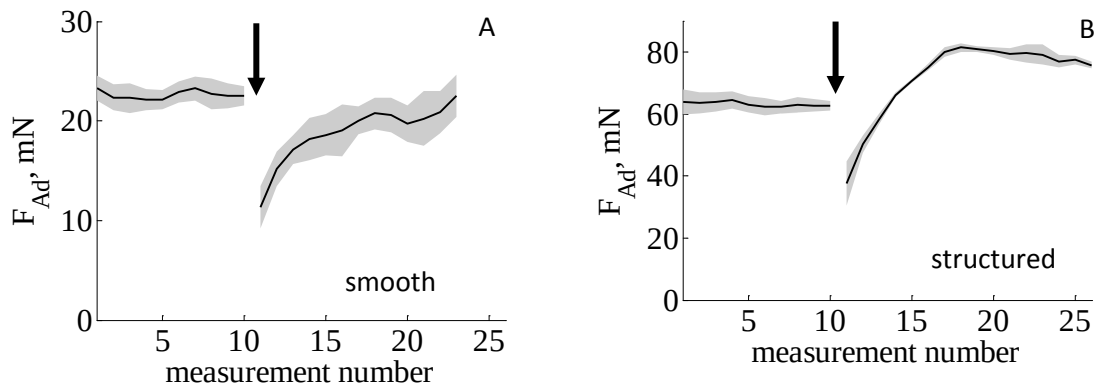


Abbildung 34: Entwicklung der Haftkraft von Öl-benetztem glatten (A) und strukturierten (B) Material. Der Pfeil zeigt den Zeitpunkt der Öl-Applikation. Die grauen Bereiche sind die Fehlerintervalle um den Mittelwert.

Strukturierte Probe. Die mittlere Haftkraft einer mikrostrukturierten Probe auf dem glatten Substrat betrug $63,5 \pm 0,97$ mN, und war damit 2,8 mal höher als die der glatten Probe. Dieser Wert war ähnlich einem anderen Wert, der für Glass gemessen wurde. Die Haftung der trockenen, strukturierten Proben veränderte sich nicht während der Messungen (erste zehn Messungen, Abb. 34B).

Bei der ersten Messung nach der Öl-Applikation sank die Haftung auf 69% des Niveaus der trockenen Haftung. Bei den darauffolgenden Messungen erreichte die Haftung ein Maximum bei der achten Messung, welches 1,22 mal höher war als die trockene Haftung. Bei den weiteren Messungen sank die Haftung monoton auf das Niveau der trockenen Haftung (Abb. 34B). Der ansteigende Teil der Kurve könnte durch den dünner werdenden Ölfilm erklärt werden, während der abnehmende Teil bedingt war durch die kontinuierliche Abnahme der Gesamtfläche, die von Öl bedeckt war.

Die asymptotische Annäherung der Haftung an das trockene Niveau war langsamer bei der mikrostrukturierten Probe (Abb. 34), da diese die Flüssigkeit besser speichert, und/oder sie langsamer in die Kontaktfläche abgab.

Schlussfolgerungen

Die mikrostrukturierte Oberfläche hat eine stärkere maximale Haftkraft verglichen mit der glatten Oberfläche auf einem glatten Substrat, bei trockenem und Öl-vermitteltem Kontakt. In Anwesenheit von Öl hat die mikrostrukturierte

Oberfläche eine stärkere Haftung verglichen mit einem trockenen Kontakt, während die glatte Oberfläche geringere oder vergleichbare Maximalhaftung aufweist, im Vergleich mit dem trockenen Kontakt. Die mikrostrukturierte Oberfläche ermöglicht es dem Material, die Flüssigkeit effektiver zu speichern, im Gegensatz zur glatten Oberfläche.

II.1.3.3 Untersuchungen zur Haftkrafterhöhung biologisch-inspirierter Adhäsive

Prinzip der Kontaktaufteilung

Die Fähigkeit einiger Tiere sich scheinbar problemlos senkrecht, sogar über Kopf, auf nahezu allen Oberflächen fortzubewegen, ohne die Haftung zu verlieren, hat seit nunmehr über zehn Jahren das Interesse der Wissenschaft geweckt (z.Zt. mehr als 250 publizierte Arbeiten). Diese Arbeiten lassen sich in drei Gruppen unterteilen: 1. Arbeiten, die die komplexen biologischen Haftsysteme beschreiben (siehe Abbildung 35), 2. Arbeiten, die versuchen die physikalischen Mechanismen biologischer Haftsysteme zu abstrahieren und 3. Arbeiten, die simplifizierte künstliche Haftsysteme auf Basis der Arbeiten aus 1. und 2. herstellen und charakterisieren. Offensichtlich gehören diese drei Arten von Arbeiten zu verschiedenen Forschungsstadien und folgen, idealerweise, aufeinander. Dabei können Fehlinterpretationen der Arbeiten aus 1. und 2. zu falschen Schlussfolgerungen bei der Herstellung künstlicher Haftsysteme führen, so dass diese nicht die gewünschten Effekte zeigen.

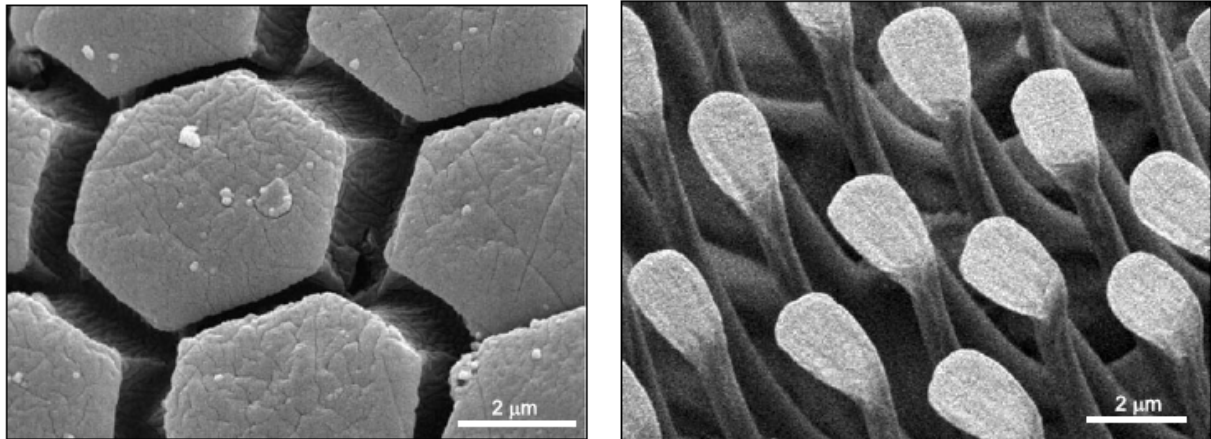


Abbildung 35: Beispiele von mikrostrukturierten biologischen Haftsystemen, (links) hexagonale Mikrostruktur des Grünen Heupferds und (rechts) spatelförmig terminierte Hafthaare einer Blauen Schmeißfliege.

Analysiert man die Haftsysteme von verschiedenen Tieren, welche sich unabhängig voneinander in verschiedenen Gruppen von Tieren entwickelt haben, stellt man eine interessante Korrelation zwischen Tiergewicht und Eigenschaften der Haftsysteme fest: Je schwerer das Tier, umso kleiner und dichter gepackt findet man die einzelnen Hafthaare. Basierend auf dieser Beobachtung wurde das Prinzip der Kontaktaufteilung eingeführt und als hauptsächlich verantwortlich für die erhöhte Haftung solcher Strukturen angesehen. Diese Hypothese besagt, dass sich die Haftung im Allgemeinen erhöht, wenn man einen großen Kontakt bei gleichbleibender Fläche in viele kleine aufteilt. Leider widersprechen diesem Prinzip viele experimentelle Arbeiten aus 3. So wurde z.B. die Haftung von Proben mit einer regelmäßigen Anordnung von kleinsten Zylindern, die die Hafthaare von Tieren imitieren sollen, mit einer glatten Kontrollprobe des gleichen Materials und gleicher Kontaktfläche verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass immer die glatte Kontrollprobe eine höhere Haftung aufwies.

Aufgrund dieser offensichtlichen Unstimmigkeit zwischen Theorie und Praxis zielt daher diese Arbeit darauf ab, das Prinzip der Kontaktaufteilung einer systematischen Überprüfung zu unterziehen.

Zu diesem Zweck wurden unterschiedlich mikrostrukturierte Proben aus Polyvinylsiloxan (PVS) hergestellt. Neben einer glatten, unstrukturierten Kontrollprobe (Kontaktflächenanteil 100 %) wurden zwei Typen hexagonalstrukturierter Proben (jeweils Kontaktflächenanteil 75 und 25 %) mit

charakteristischen Strukturgrößen von 10, 20, 50 und 95 μm miteinander auf ihre Haftkraft verglichen. Abbildung 36 zeigt exemplarisch die zwei Typen der hexagonal-strukturierten Proben.

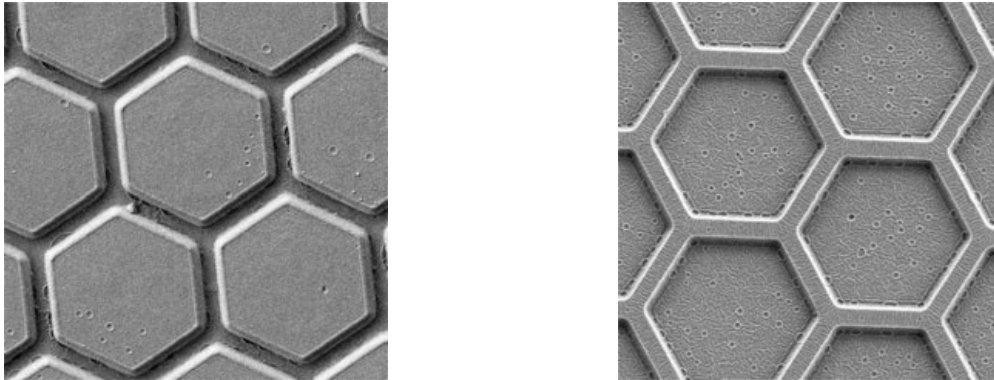


Abbildung 36: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zweier Typen hexagonal-strukturierter PVS Oberflächen. (Links) strukturierte Oberfläche mit einem Kontaktflächenanteil von 75 % und (rechts) strukturierte Oberfläche mit einem Kontaktflächenanteil von 25 %. Die Seitenlänge der Hexagone beträgt 10 μm .

Bei den hexagonal-strukturierten Proben ist zu beachten, dass trotz unterschiedlich großer Strukturen die Gesamtkontaktfläche identisch bleibt.

Mittels eines selbstentwickelten Mikrotribometers mit passiver Selbstausrichtevorrichtung wurden die Haftkräfte der unterschiedlichen Proben in Kontakt mit Glas in einer flachen Kontaktgeometrie gemessen.

Abbildung 37 (a) zeigt die Ergebnisse der Haftkräfte für die verschiedenen strukturierten Proben, sowie für die unterschiedlichen Strukturgrößen. Dabei zeigt sich, sowohl bei den Proben mit einem Kontaktflächenanteil von 75 % als auch mit 25 %, dass es keine signifikante Erhöhung der Haftkraft mit steigender Anzahl an Kontakten (kleinere Strukturgröße bei konstanter Kontaktfläche) gibt. Dieses Ergebnis widerspricht deutlich dem (theoretischen) Prinzip der Kontaktaufteilung.

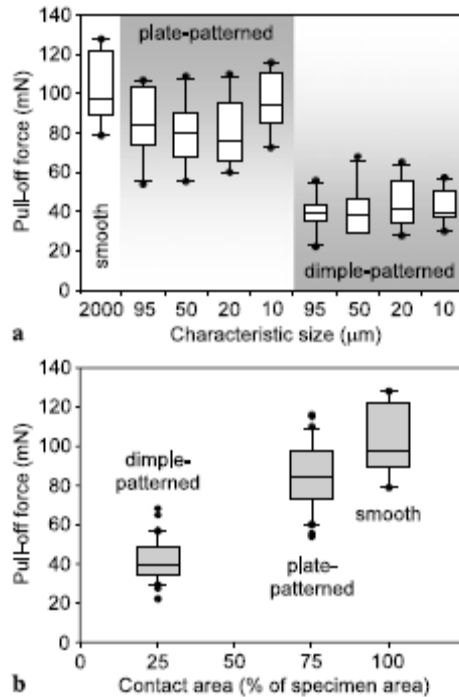


Abbildung 37: Haftkräfte der hexagonal-strukturierten und glatten Kontrollproben gemessen auf Glas. (a) vollständiger Datensatz. (b) Daten der Haftkräfte der unterschiedlich strukturierten Proben aufgetragen über die prozentuale Kontaktfläche. Für jeden Strukturtyp wurden die Daten der unterschiedlichen Strukturgrößen zusammengefasst.

Abbildung 37 (b) zeigt eine deutliche Korrelation zwischen der Haftkraft und der Kontaktfläche, unabhängig von der Strukturanzahl und -größe. Daraus schließen wir, dass Prinzip der Kontaktaufteilung in seiner jetzigen Form nicht vollständig ist.

Es wurden sehr wohl erhöhte Haftkräfte mikrostrukturierter Proben im Vergleich zu einer glatten Kontrolle des selben Materials gemessen. Doch all diese Proben hatten gemein, dass sie im Gegensatz zu denen Proben hier, eine zweite Hierarchieebene hatten, wie z.B. in Abbildung 35 rechts bei den Spatel-förmigen Hafthaaren der Blauen Schmeißfliege zu sehen ist. In diesem Fall wird der Kontakt zwar auch auf mehrere Subkontakte verteilt, aber die entscheidende Kontaktgeometrie besteht nicht wie hier aus einer flachen Stempelgeometrie, sondern einem sehr dünnen sogenannten Spatel. Experimentelle Studien konnten zeigen, dass erst die spatelartigen Kontaktgeometrien in der Lage sind, erhöhte Haftung, sogar im Vergleich zu einer glatten Kontrollprobe, zu erzeugen. Als besonders haftfähig hat sich die symmetrische spatelförmige, oder auch pilzkopfförmige, Kontaktgeometrie erwiesen.

Physikalische Ursache der erhöhten Haftfähigkeit pilzkopfförmig mikrostrukturierter Oberflächen

Gleich mehrere experimentelle Arbeiten zeigten in jüngster Zeit das pilzkopfförmig mikrostrukturierte Oberflächen (Abbildung 38 (a-b)) eine erhöhte Haftung, im Vergleich mit allen bisher getesteten Kontaktgeometrien, in Normalenrichtung aufweisen. Diese Kontaktgeometrie ist maßgeblich von den Hafthaaren männlicher Blattkäfer inspiriert, findet sich aber in einer Vielzahl von aquatisch und terrestrisch lebenden Tieren und Pflanzen. Bis dato existiert keine physikalische Theorie, die diesen Effekt beschreiben kann. Im Folgenden soll durch den Vergleich der Haftung eines flachen Stempels (Abbildung 38 (d)) und eines pilzkopfförmigen Stempels (Abbildung 38 (c)) eine physikalische Erklärung für die erhöhte Haftung gegeben werden.

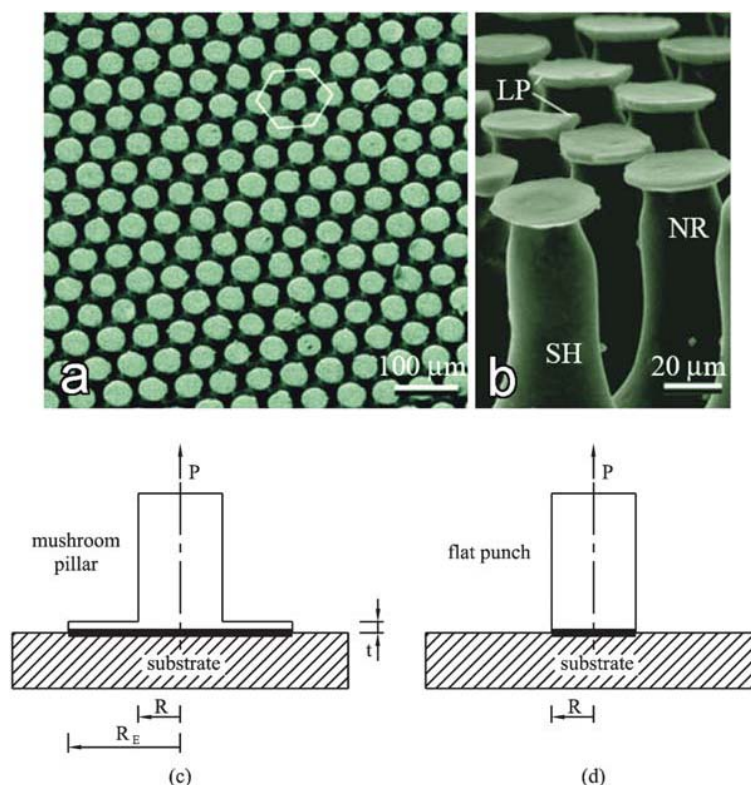


Abbildung 38: Pilzkopfförmig mikrostrukturierte Poly(vinylsiloxan) Oberfläche, (a) Draufsicht, (b) Seitenansicht. Schematische Darstellung einer Pilzkopfstruktur (c) und eines flachen Stempels (d).

Für den flachen Stempel ist die Spannungsverteilung unter Zugbelastung bekannt. Sie zeigt an den Ecken (bei Radius $r = R$) eine

Spannungskonzentration (Abbildung 39 (a)), die sich mit Hilfe einer asymptotischen Lösung der linearen Bruchmechanik beschreiben lässt. Dadurch löst sich der flache Stempel durch Rissausbreitung von außen nach innen ab.

Die Spannungsverteilung der Pilzkopfstruktur lässt sich als Superposition des flachen Stempels und der flachen Kontaktplatte verstehen. Dabei lässt sich eine optimale Dicke der Kontaktplatte hinsichtlich der Spannungsverteilung feststellen. Ist die Dicke zu klein verbleiben Spannungsspitzen beim Radius R des Stempels (Abbildung 39 (b)). Ist die Dicke zu groß bilden sich Spannungsspitzen am äußeren Radius R_E der Kontaktplatte (Abbildung 39 (d)). Nur bei einer optimalen Dicke wird eine homogene Spannungsverteilung innerhalb der Kontaktfläche erreicht (Abbildung 39 (c)). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Aufgabe der dünnen Kontaktlippen die Eliminierung der Spannungsspitzen an den Kanten hat. Unter der Annahme einer optimalen Geometrie lässt sich also sagen, dass die erreichbare Haftung einer Pilzkopfstruktur, der eines flachen Stempels entspricht, der seine theoretische Haftfestigkeit aufgrund einer absolut gleichmäßigen Spannungsverteilung erreicht.

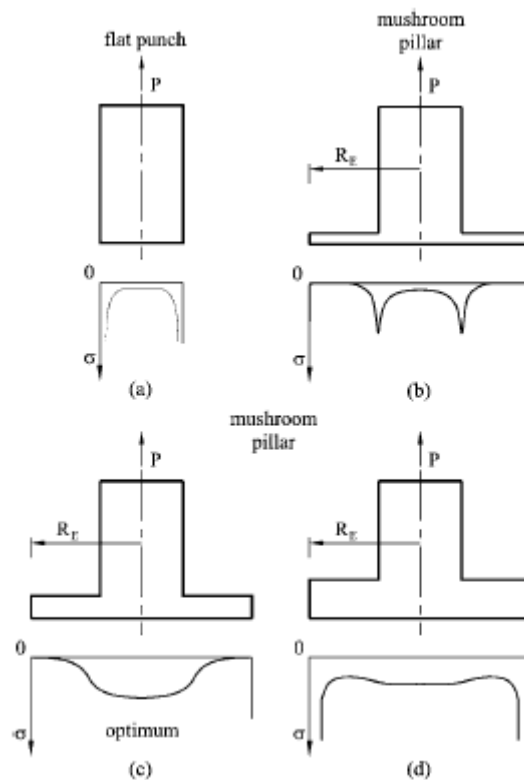


Abbildung 39: Spannungsverteilung unter angelegter Zugkraft P eines flachen Stempels (a) und dreier Pilzkopfstrukturen mit unterschiedlich dicken Kontaktflächen (b-d).

Auf Basis dieses Modells konnten nun erstmals erfolgreich experimentell gemessene Haftwerte von Pilzkopfstrukturen theoretisch bestätigt werden.

In dieser Arbeit wurde das erste physikalische Modell zur Erklärung der beeindruckenden Haftfähigkeit von Pilzkopfstrukturen vorgestellt. Die Vorhersagen sind in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Darüber hinaus bietet dieses Modell die Grundlage zur Bestimmung optimaler Designparameter für die Herstellung künftiger künstlicher, biologisch-inspirierter Haftsysteme.

II.2 Verwertbarkeit

II.2.1 Industrielle Verwertung (Gottlieb Binder GmbH)

II.2.1.1 Einsatzbereiche des Gecko® Nanoplast® Haftbands

Mit dem Gecko® Nanoplast® Haftband konnte die Firma Gottlieb Binder GmbH & Co. KG das erste kommerziell erhältliche Haftband auf den Markt bringen, welches auf den Prinzipien der Haftung des männlichen Ampferblattkäfers (*Gastrophysa viridula*), und damit auf dem Prinzip vieler Insekten und auch dem des Geckos basiert. Das Produkt verwendet zur Haftung keinen Klebstoff, sondern erreicht seine Haftfähigkeit aufgrund der vielen kleinen „Härchen“, die das Funktionsprinzip des Käferhaftsystems imitieren.

Das Tape hinterlässt daher keine Rückstände und ist weniger verschmutzungsanfällig als herkömmliches Klebeband, kann aber auch nach Kontaminationen problemlos abgewaschen werden und seine ursprüngliche Haftkraft wieder erreichen. Das Gecko® Nanoplast® Haftband ist daher über viele tausend Haftzyklen einsetzbar und dementsprechend ein innovatives, ressourcen- und umweltschonendes Material.

Die möglichen Einsatzfelder sind dabei vielfältig; das Band kann bei folgenden konkreten Anwendungen eingesetzt werden:

- bei der Linsenverarbeitung als schützendes Haftband für die Haltung kratzsensitiver, hochpolierter Glasflächen,
- als wiederverwendbares Haftpad für die Fixierung kleiner Objekte an glatten Oberflächen,
- bei der Greifermanipulation für die Aufnahme und den Transport feiner, leicht brechbarer und verschmutzungsanfälliger Siliziumscheiben und Solarbatterien oder Smartphones bzw. deren Displays (wie von der Firma Festo unter anderem auf der Hannover Messe 2012 demonstriert),
- beim Transport von Papier in Einzelblattgreifmechanismen,
- zum Vermeiden von Polymerquietschen und Ruckgleitung und

- für die Verbesserung der haptischen Eigenschaften von Polymeroberflächen.

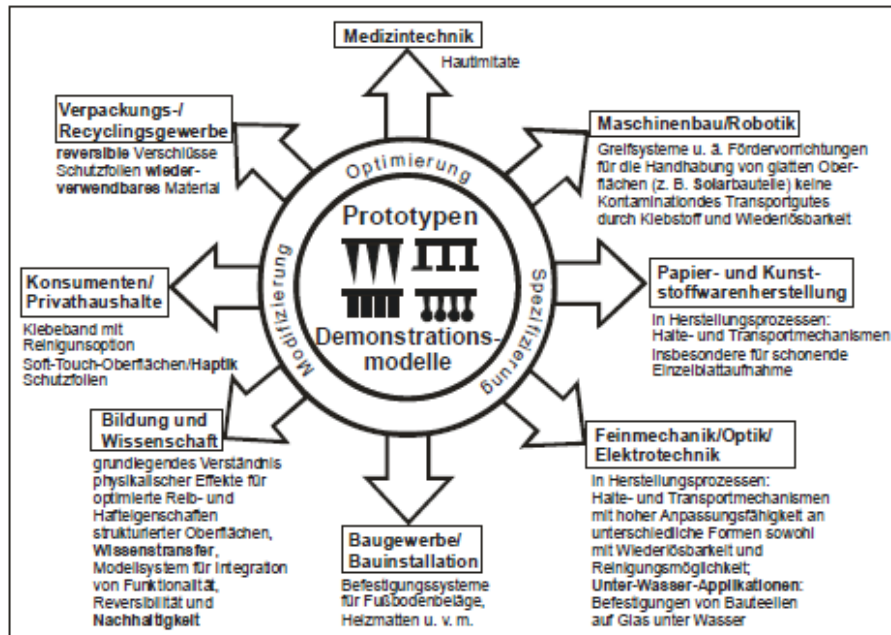


Abbildung 40: Ausgewählte potenzielle Wirtschaftszweige, Gewerbe/Branchen und Anwendungen für das bio-inspirierte klebstofffreie Haftmaterial.

II.2.1.2 Robotik

Ein spezieller Einsatzbereich der oben erwähnten Möglichkeiten ist die Robotik, die die verschiedenen Vorteile des Gecko® Nanoplast® Haftbands vereint. Lauf- bzw. Kletterroboter können das Band einsetzen, um glatte Flächen zu erklimmen (z.B. auf Solaranlagen). Dabei kommt ihnen zugute, dass das Tape keinerlei Rückstände auf den Oberflächen hinterlässt. Die Wiederverwendbarkeit des Tapes hat zudem ein enormes Einsparpotential zum einen an Material, zum anderen aber auch an Energie, wenn man das System mit einem Kletterroboter vergleicht, der sich mittels Vakuumvorrichtung am Substrat hält und dafür ständig Pumpen betreiben muss. Roboter, die in schwierig zugänglichen Bereichen eingesetzt werden, können sich die Hafteigenschaften des Bandes ebenso zu Nutze machen, wie beispielsweise Inspektionsroboter in Pipelines o.ä.

Greifroboter, die in Herstellungsprozessen eingesetzt werden, um Teile zu transportieren, profitieren ebenso von der rückstandsfreien, energiesparenden

Methode. Solche Greifprozesse, die mit dem Gecko® Nanoplast® Haftband auch im Vakuum oder unter Wasser ablaufen können, wurden von der Firma Binder und der Firma Festo erfolgreich demonstriert.

II.2.1.3 Medizinischer Einsatzbereich

Das Gecko® Nanoplast® Haftband wurde verschiedenen Tests mit Hinblick auf einen möglichen medizinischen Einsatz unterzogen und wurde aufgrund folgender Beurteilung als für den medizinischen Einsatz geeignet beurteilt (siehe auch www.binder.de/de/produkte):

- Zytotoxizität von Eluaten gemäß DIN EN ISO 10993-5, 1999-11, Biologische Beurteilung von Medizinprodukten
- Primary Skin Irritation Test DIN EN ISO 10993-10
- Hämkompatibilität gemäß ISO 10993-4 (Thrombozyten, Hämolyse, Koagulation, Komplementaktivierung)
- Luftdurchlässigkeit nach ASTM D1434-82

Im medizinischen Bereich sind verschiedene Anwendungen denkbar. So könnte das Band zum Beispiel bei der Fixierung von verletzten Gelenken oder Knochen dienen, so wie zum Wundverschluss eingesetzt werden. Weitere Möglichkeiten des klinischen Einsatzes sind im Laufe der Zeit zu erwarten.

II.2.2 Verwertung der Ergebnisse (AG Funktionelle Morphologie und Biomechanik, CAU Kiel)

Die Untersuchung biologischer Haftsysteme und deren Verständnis wird auch weiterhin Teil der Grundlagenforschung in der AG Funktionelle Morphologie und Biomechanik der Universität Kiel sein. Deren Umsetzung in technische Produkte sowie deren stetige Verbesserung bleibt dabei immer ein Ziel.

II.2.2.1 Weitere Forschung im Bereich der künstlichen Haftmaterialien

Nach Ablauf des BMBF-geförderten Projekts wird weiterhin ein Doktorand durch ein Stipendium der Firma Binder finanziert und vertieft die Kenntnisse über das Funktionsprinzip des Gecko® Nanoplast® Haftbands. Die physikalischen Hintergründe der Haftung besser zu verstehen und zu entschlüsseln ist unerlässlich bei der weiteren Verbesserung des Materials. Ziel dabei ist es unter anderem, das Haftband universeller einsetzbar und somit noch interessanter für (industrielle) Anwendungen zu machen.

II.2.2.2 Verwertung in studentischer Lehre

Die in unserer Arbeitsgruppe durch das Projekt etablierten Methoden (z.B. Haft- und Reibungskraftmessungen, verschiedene mikroskopische Anwendungen) finden Eingang in studentische Praktika sowie Abschlussarbeiten. Die Ergebnisse des Projekts werden darüber hinaus in Vorlesungen und Kursen im Bachelor- und Masterstudium eingebaut und den Studenten somit möglichst früh nähergebracht. Dabei wird sowohl auf die biologischen Grundlagen als auch auf deren technische Umsetzung und Anwendungsmöglichkeiten Wert gelegt.

II.2.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Der Erfolg des Projekts „Biologische Inspiration für klebstofffreies Haftmaterial“ beruht einerseits auf den umfangreichen wissenschaftlichen Grundlagenarbeiten, andererseits auf der hervorragenden Kooperation mit dem Projektpartner Gottlieb Binder GmbH & Co. KG. Die enge Verzahnung der beiden Seiten – Wissenschaft und Technik – ermöglichte die Entwicklung von der Grundlagenforschung hin zu einem marktreifen Produkt. Die ständige Rückkopplung in beide Richtungen sorgte zudem für eine stete Optimierung sowohl des Produkts bei der Firma Binder als auch der Testverfahren in unserer Arbeitsgruppe. Diese Zusammenarbeit liefert die Grundlage für auch weiterhin hervorragende Erfolgsaussichten in technischer Hinsicht durch die Ergebnisse des Projekts. Auch wissenschaftlich wurde ein umfangreiches Know-How erworben, welches als Basis für weitere Forschung auf dem Gebiet dient. Die kurz-, mittel- und langfristigen Erfolgsaussichten, wie sie zu Projektbeginn zu erwarten waren, informiert Abbildung 41. Dort sieht man,

welche Felder im Laufe des Projekts erfolgreich umgesetzt wurden und wie die weiteren Erfolgsaussichten zu bewerten sind. Die dort gesteckten Ziele wurden erreicht, daher sind auch die weiteren langfristigen Erfolge als realistisch zu betrachten.

II.2.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit steht außer Frage (siehe auch andere Punkte unter II.2). Die erzielten Ergebnisse, der damit verbundene Erkenntnisgewinn sowie die wissenschaftlichen Publikationen sind wertvolle Grundvoraussetzungen für weitere Forschung auf dem Gebiet der künstlichen, bio-inspirierten Haftmaterialien in der Zukunft. Die Abläufe können durch das Zurückgreifen auf die bis hierher gewonnenen Ergebnisse und neu etablierten Methoden so in Zukunft verkürzt werden,

Die herstellungs- und verfahrenstechnische Weiterentwicklung des bio-inspirierten, klebstofffreien Haftmaterials Gecko® Nanoplast® obliegt in erster Linie dem Projektpartner Gottlieb Binder GmbH & Co. KG. Eine weitere Zusammenarbeit ermöglicht dabei weiterhin die Verknüpfung der wissenschaftlichen Testmethoden in unserer Arbeitsgruppe mit den industriellen Herstellungsmöglichkeiten der Firma Binder.

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

Im Bereich der industriellen Herstellung biologisch inspirierter, klebstofffreier Haftmaterialien sind uns von anderen Stellen keine Erfolge bekannt.

II.4 Eigene Veröffentlichungen, Kooperationen und Öffentlichkeitsarbeit

II.4.1 Wissenschaftliche Publikationen

2009

Eigenbrode, S.D., Snyder, W.E., Clevenger, G., Ding, H., and Gorb, S.N. (2009) Variable attachment to plant surface waxes by predatory insects. . In: Gorb,

S.N. (Ed.) Functional surfaces in biology - Adhesion related phenomena. Vol. 2. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York. pp. 157-181.

Voigt, D., Gorb, E., and Gorb, S.N. (2009) Hierarchical organisation of the trap in the protocarnivorous plant *Roridula gorgonias* (Roridulaceae). Journal of Experimental Biology 212, 3184-3191. doi:10.1242/jeb.034280.

2010

Bauer, G.; Klein, M.-C.; Gorb, S. N.; Speck, T.; Voigt, D.; Gallenmüller, F. (2010): Always on the bright side: the climbing mechanism of *Galium aparine*. Proceedings of the Royal Society B 00: 1–7. doi:10.1098/rspb.2010.2038.

Gorb, EV, Hosoda, N, Miksch, C, and Gorb, SN (2010) Slippery pores: anti-adhesive effect of nanoporous substrates on the beetle attachment system. J. R. Soc. Interface, doi:10.1098/rsif.2010.0081

Gorb, SN, and Voigt, D (2010) Funktionale biologische Oberflächen als Vorbilder für die Technik. Performance, Doppelausgabe 2.2009/1.2010: 68-77.

Gorb, SN (2010) Biological and biologically inspired attachment systems. In: Bhushan, B (Ed.) Springer Handbook of Nanotechnology ISBN 978-3-642-02524-2, Hardcover, Springer Verlag: Heidelberg, pp. 1525-1551.

Roth-Nebelsick, A., Voigt, D., and Gorb, S.N. (2010) Cryo-scanning electron microscopy studies of pits in *Pinus wallichiana* and *Mallotus japonicus*. IAWA Journal 31: 257-267.

Voigt, D.; Gorb, S. (2010): Desiccation resistance of adhesive secretion in the protocarnivorous plant *Roridula gorgonias* as an adaptation to periodically dry environment. Planta 232: 1511-1515.

Voigt, D, and Gorb, S (2010) Egg attachment of the asparagus beetle *Crioceris asparagi* to the crystalline waxy surface of *Asparagus officinalis*. Proc. R. Soc. B: 277: 895-903. DOI:10.1098/rspb.2009.1706.

Voigt, D, Schuppert, JM, Dattinger S, and Gorb, SN (2010) Temporary stay at various environmental humidities affects attachment ability of Colorado potato beetles *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera, Chrysomelidae). Journal of Zoology 281 (2010) 227–231.

2011

Barnes, W. J. P., Perez Goodwyn, P. J., Nokhbatolfoghahai, M. and Gorb, S. N. (2011) Elastic modulus of tree frog adhesive toe pads. *J. comp. Physiol. A* 197 (10): 969-978.

Bußhardt, P., Gorb, S. N. and Wolf, H. (2011) Activity of the claw retractor muscle in stick insects in wall and ceiling situations. *J. Exp. Biol.* 214: 1676-1684.

Carbone, G., Pierro, E. and Gorb, S. N. (2011) Origin of the superior adhesive performance of mushroom-shaped microstructured surfaces. *Soft Matter* 7: 5545-5552.

Filippov, A., Popov, V. L. and Gorb, S. N. (2011) Shear induced adhesion: contact mechanics of biological spatula-like attachment devices. *J. Theor. Biol.* 276: 126-131.

Gorb, S. N. (2011) Biological fibrillar adhesives: functional principles and biomimetic applications. In: *Handbook of Adhesion Technology*. pp.1410-1436. Springer, Berlin, Heidelberg.

Pantano, A., Pugno, N. M. and Gorb, S. N. (2011) Numerical simulations demonstrate that the double tapering of the spatulae of lizards and insects maximize both detachment resistance and stability. *Int. J. Frac.* 17102: 169 – 175.

Varenberg, M., Murarash, B., Kligerman, Y. and Gorb, S. N. (2011) Geometry-controlled adhesion: revisiting the contact splitting hypothesis. *Appl. Phys. A*. 103: 933-938.

2012

Bußhardt, P. and Gorb, S. N. (2012). Walking on smooth and rough ground: Activity and timing of the claw retractor muscle in the beetle *Pachnoda marginata peregrina* (Coleoptera, Scarabaeidae). *Journal of Experimental Biology* doi:10.1242/jeb.075614.

Bußhardt, P., Wolf, H. and Gorb, S. N. (2012). Adhesive and frictional properties of tarsal attachment pads in two species of stick insects (Phasmatodea) with smooth and nubby euplantulae. *Zoology* 115, 135-141.

Wolff, J. O. and Gorb, S. N. (2012) The influence of humidity on the attachment ability of the spider *Philodromus dispar* (Araneae, Philodromidae). *Proc. R. Soc. B* 279 (1726): 139-143.

II.4.2 Teilnahme an Tagungen, Kongressen, Veranstaltungen

2008

Bionik-Kongress Bremen, November 2008, Vortrag, Poster.

BIONA Statusseminar, Bad Honnef, November 2008, Vortrag, Poster.

2009

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)

2010

29. GdO-Tagung in Rothenburg ob der Tauber, 19.03.2010 - 21.03.2010 (Vortrag).

Hannover Messe Industrie 2010, Beteiligung im Rahmen des BIONA Projekts, 19.04.2010 – 23.04.2010

Society for Experimental Biology, Annual Main Meeting 2010, Prague (Czech Republic), 30.06.2010 - 03.07.2010 (3 Vorträge).

6th Nanoscience and Nanotechnology Conference, Izmir (Türkei), 15.06.2010-18.06.2010 (Vortrag und Poster).

2011

Treffen Editorial Board "Bioinspiration & Biomimetics", London, UK (24.-26.02.2011)

Gesellschaft Deutschsprachiger Odonatologen (DGO), Lübeck (19./20.03.2011)

DgaaE-Entomologentagung (21.-24.03.2011, Vortrag, Poster)

Hannover Messe Industrie 2011, Beteiligung im Rahmen des BIONA Projekts (04.-08.04.2011)

Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Atlanta, USA (14.-19.05.2011)

2nd Scientific Workshop Cost Action TD0906, Biological Adhesives, Mons, Belgien (18.-20.05.2011, Vortrag)

Nanotribology Meeting, Hoi An, Vietnam (21.-27.05.2011)

ESA, Telefonkonferenz Kooperationsgespräch (09.06.2011)

Jahrestagung der Society of Experimental Biology, Glasgow (01.-04.07.2011, 7 Vorträge)

Advanced and bio-inspired nanomechanics Advanced School - Centre of International Solid Mechanics, Udine, Italy (6 Bionik-Vorlesungen) (18.-22.07.2011)

Microscopy Conference MC 2011, Kiel/Germany 28.08.–02.09.2011 (5 Poster, 3 Vorträge)

AVS Symposium Nashville, Tennessee 31.10.-04.11.2011

2012

Gesellschaft Deutschsprachiger Odonatologen (DGO), Freiberg (09./10.03.2012)

Bionik-Symposium, Mainzer Akademie, (20.01.2012, 1 Vortrag)

1. Materials for x-treme Sports Kongress, München (31.01.2012, 1 Vortrag)

Hannover Messe Industrie 2012, Beteiligung im Rahmen des BIONA Projekts (23.-27.04.2012)

Veranstaltungsreihe Bionik im Betrieb- Workshop Oberflächen, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Firma Rittal, Bionik-Sigma (08.05.2012, Vortrag)

18. Schwerpunkttreffen NINA –Norddeutsche Initiative Nanomaterialien (07.06.2012, Gastgeber)

Forum Mensch & Technik, Firma TETRA, Ilmenau (30.05.2012, Vortrag)

Biodiversity Summerschool 2012, Osnabrück (03.07.2012)

Bionik-Kongress, Bremen, (26./27.10.2012, 2 Vorträge, 10 Poster)

Deutsche Gesellschaft für Limnologie, Koblenz (26.09.2012, 2 Vorträge)

II.4.3 Eingeladene Vorträge

2009

Gorb, S. N. (29.9.-2.10.2009) Willi-Hennig-Symposium an der Universität Hohenheim, Stuttgart.

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

2010

Gorb, S. N. (30.4.2010) Endess+Hauser, Vortrag zur Einweihung des neuen Werks in Berlin

Ditsche-Kuru, P. (12.05.2010) Vortrag beim Symposium „Energie und Bionik“, ITV Denkendorf.

Gorb, S. N., (24.06.2010) TU München, Ringvorlesung Bionik

Ditsche-Kuru, P. (15.12.2010) Vortrag beim Limnologische Seminar, Limnologische Station Iffeldorf der TU München.

2011

Gorb, S. N. (31.03.2011) Vortrag beim Leibnitz Institut für Pflanzenbiochemie, Halle

Gorb, S. N. (06/07.06.2011) Vortrag beim Bionik Symposium BASF Weinheim

Gorb, S. N. (16.06.2011) Vortrag bei der Eröffnung der Bionik Ausstellung der Botanischen Gärten

Gorb, S. N. (21.06.2011) Vortrag Kieler Uni auf der Kieler Woche

Gorb, S. N. (07.07.2011) Vortrag an der TU Braunschweig, Einladung durch Prof. Suhling, Institut für Geoökologie

Gorb, S. N. (08.07.2011) Bionik-Festvortrag beim Sommerfest der Technischen Fakultät der CAU Kiel

Gorb, S.N. (16.11.2011) Vortrag an der Politecnico di Bari

Gorb, S.N. (22.11.2011) Seminar-Vortrag bei Montanuniversität Leoben, Österreich

Gorb, S.N. (28.11.-02.12.2011) Key note lecture at the 4th Material Research Science Meeting, Boston

Gorb, S.N. (12.12.2011) Vortrag beim Forschungszentrum Jülich

2012

Gorb, S. N. (24.02.2012) Vortrag bei Mainzer Akademie

Gorb, S. N. (04.05.2012) Vortrag bei TU Illmenau, FG Mechatronic

Gorb, S. N. (21.05.2012) Vortrag bei Schleswig-Holsteinische Universitäts-Gesellschaft Sektion Kiel

Gorb, S. N. (04.07.2012) Vortrag bei MPI of Colloids and Interfaces, Potsdam

Gorb, S.N. (11.07.2012) Vortrag an der TU Darmstadt, Eudard-Zintl-Insitut

II.4.4 Öffentlichkeitsarbeit

- Deutsche Welle, Beitrag zum Thema Bionik im Rahmen von future now (Februar.2011)
- Magazin der Heinrich-Böll-Stiftung, Beitrag über „Vorbild: Gecko“ im Rahmen von „Innovationspotenzial aus der Natur (Februar 2011)
- IF Gold Award 2011 (Materialien), Übergabe an Stanislav Gorb und Binder GmbH auf der CeBit (01. 03.2011)
- Wissenschaft, Beitrag „Klebband ohne Klebstoff“ (22.03.2011)
- Artikel über „Wall-Walker Wonders“ in Engineering Design & Testing Corp. (März 2011)
- Kieler Nachrichten, Beitrag „Ein Klebeband nach Gecko-Art“ (07.04.2011)
- Uni zum Mitmachen auf der Kieler Woche, 2 Beiträge (21.05.2011)
- Newsletter_Förderverein – Förderverein der Mathematischen-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Beitrag zum IF Gold Award 2011 (Juni 2011)
- Osnabrücker Zeitung, Ankündigung Vortrag bei Botanischer Woche (11.07.2011)
- BBC Dokumentationsfilm über Materialien der Zukunft, „The secret life of Material“(24.-25.07.2011)
- Kieler Nachrichten, Artikel „Inspiration aus der Natur“ (28.07.2011)
- Kieler Express, „Wunder echten Kontaktes“ (10.08.2011)

- Kieler Nachrichten, Beitrag „Mit den Blättern immer auf der Sonnenseite“ (11.08.2011)
- Offener Kanal Kiel Beitrag übers Gecko-Tape (03.08.2011)
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Heft Nanotechnologie in der Natur – Bionik im Betrieb (Band 20), Kapitel „Hochleistungsfähige, reversible Haftverbindungen (August 2011)
- Beitrag „Moth-Eye Reflections“ in <http://biocontrolbeat.wordpress.com>
- „Why Spiders Will Always find you“ Beitrag in DiscoveryNews (29.10.2011)
- „'Crazy' Tape holds weight of man“ Beitrag in DiscoveryNews (09.11.2011)
- “A biologically inspired tape uses some of nature’s tricks to stick” Beitrag in EurekAlert (04.11.2011)
- “Insects inspires mother of all adhesives” Beitrag in Eco News (06.11.2011)
- “Raffiniert im Töten” Beitrag im Tages-Anzeiger (23.11.2011)
- Dreharbeiten von Discovery Channel Canada über Gecko-Tape (08.12.2011)
- Informationsdienst Wissenschaft, Beitrag zum Thema Geckotape (13.01.2012)
- Deutsche Welle, Beitrag zum Thema Geckotape (13.01.2012)
- Discovery Channel Canada, Beitrag zum Thema Geckotape (04.04.2012)
- Podcast Wissenschaft, Bionik-Der Natur abgeschaut, DW.de, 05.04.2012
- Innovationnewedaily.com, Beitrag über Geckotape (30.04.2012)
- Kieler Nachrichten, Beitrag Geckotape (21.05.2012)
- www.nature.com, Beitrag über Resilin bei Copeoden (29.06.2012)
- Russia II (TV), Interview zum Thema Geckotape (20.07.2012)
- Spektrum.de, Beitrag zu Unterwasserspaziergang von Käfern (10.08.2012)
- Discover Magazine, Beitrag zu Unterwasserspaziergang von Käfern (08.08.2012)
- Biotechnologie, Beitrag zu Unterwasserspaziergang von Käfern (10.08.2012)
- Nature, Beitrag zu Unterwasserspaziergang von Käfern (10.08.2012)

- NIMS, Beitrag zu Unterwasserspaziergang von Käfern (09.08.2012)
- ScienceDaily, Beitrag zu Unterwasserspaziergang von Käfern (10.08.2012)
- ATZ online, Beitrag zu Schlangenhaut (15.08.2012)
- www.alphagalileo.org, Beitrag zu Schlangenhaut (15.08.2012)
- Informationsdienst Wissenschaft, Beitrag zu Schlangenhaut (15.08.2012)
- Nano Patents and Innovations, Beitrag zu Schlangenhaut (23.08.2012)
- VBio, Beitrag zu Schlangenhaut (23.08.2012)
- Informationsdienst Wissenschaft, Beitrag zu Haftung auf Anti-Haftung (24.08.2012)
- ScienceDaily, Beitrag zu Haftung auf Anti-Haftung (24.08.2012)

II.4.5 Kontakte zu Industrie und potentiellen Projektpartnern

- Naoki Ishii, Firma Terumo, Japan, Kooperationsgespräch (18.01.2011)
- Jan Tuma, Firma Binder, Holzgerlingen (08.02.2011, 21.03.2011)
- Prof. Bettina Freude, IFM Geomar, Kiel, Kooperationsgespräch (02.03.2011)
- Prof. Thisbe Lindhost und Mirja Hartmann, CAU Kiel, Institut für Organische Chemie, Kooperationsgespräch „Bindung von Nanopartikeln an die Fili von Bakterien (11.03.2011)
- Niclas Gallen, Design 24, Buchveröffentlichung (24.03.2011)
- Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Gespräch über mögliche Kooperationsprojekte (28.07.2011)
- SPP 1412 Hierarchische Materialien, Begutachtung 2. Phase
- Prof. Florian Krug, Mutesius Kunsthochschule Hamburg, Gespräche über möglichen Bionik-Kurs (06.05.2011)
- Nees-Institut der Universität Bonn, Projektbesprechung (29.07.2011)
- Prof. Schlattman, Ingenieurwissenschaften TU Hamburg Harburg, Kooperationsgespräch (08.08.2011)

- UHU GmbH, Kooperationsgespräch (13.01.2012)
- Rexroth Bosch GmbH, Kooperationsplanung (25.01.2012)
- Mutesius Kunsthochschule (20.02.2012)
- Mercedes Benz, Hamburg, Kooperationsgespräche (29.02.2012)
- Festo Kooperationsgespräch (07.03.2012)
- Oleg Shmakov, St. Petersburg, Kooperationsgespräche (26.04.12)
- Prof. Claudia Fleck, TU Berlin und Prof. Andreas Bührig-Polacek, RWTH Aachen, Kooperationsgespräche (18./19.07.2012)
- Elena Fadeva, Laserzentrum Hannover, Kooperationsgespräche (13.11.2012)

II.4.6 Eingeladene Gastreferenten und -wissenschaftler

- Prof. Chichkow, Laserzentrum Hannover, Deutschland, Kooperationsgespräche und Vortrag (04.03.2011)
- Prof Wan Doo Kim, Department of Nature-Inspired Mechanical System, Nano Convergence & Manufacturing Systems Research, Division KIMM (Korea Institute of Machinery and Materials), Daejeon, Korea, Gastprofessor (14.03.2011 und 08.05.-07.06.2011)
- Dr. Hermann Ehrlich, Max Bergmann Center of Biomaterials, Institut für Materialwissenschaft, TU Dresden, Deutschland, Vortrag (11.05.2011)
- Kirstin Denning, FH Bremen, Vortrag (14.06.2011)
- Dr. Klaus Reinhardt, Universität Tübingen und Universität Sheffield Vortrag (20.06.2011)
- PD Dr. Anita Roth-Nebelsick, Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart, Besuch und Vortrag (10.-12.07.2011)
- Dr. Dirk Gassmann, Research Associate, NCB Naturalis, Leiden/Niederlande (02.08.2011)
- Prof. Dr. Alexander Filippov, Donezk, Institute for Physics and Engineering, National Academy of Science, Ukraine, Gastwissenschaftler und Vortrag (01.-30.08.2011)

- Georg Bauer, Universität Freiburg (01-03.08.2011)
- Axinja Stark, FH Bremen (12.08.2011)
- Prof. Jon Barnes, University of Glasgow, UK (13.-27.08.2011)
- Dr. Frank Wieland (Universität Hamburg, 06.09.2011)
- Prof. Thomas Speck und Georg Bauer (Universität Freiburg, 07./08.09.2011)
- Prof. Richard Row (Townsville, Australien, 10.10.2011)
- Prof. Werner Gnatzi (Universität Frankfurt., 14.11.2011)
- Alexander Balmert, Universität Bonn, Kooperationsgespräche (24.01.2012)
- Prof. Guiseppe Carbone, University of Bari, Italien, Vortrag und Kooperationsgespräche (20.02.2012)
- Prof. Dr. Alexander Filippov, Donezk, Institute for Physics and Engineering, National Academy of Science, Ukraine, Gastwissenschaftler und Vortrag (01.03.-01.04.2012)
- Prof. Werner Nachtigall, Universität Saarbrücken, Vortrag (23.04.2012)
- Prof. Adam Summers, University of Washington, Bionikgespräche (02.05.2012)
- Prof. Friedrich Barth, Universität Wien, Vortrag (07.05.2012)
- Prof. Wilhelm Barthlott, Universität Bonn, Vortrag (04.06.2012)
- Prof. Werner Gnatzi, Universität Frankfurt, Vortrag (17.07.2012)
- Koreanische Wissenschaftler des 2. Korean-German Joint Workshpo on Biomimetics (Haeshin Lee, Kahp-Yang Suh, Hyuneui Lim, Kyu-Bock Lee) zu Besuch beim Vizepräsidenten der CAU Kiel, Vorträge (31.07.2012)
- Dr. Joe Baio, MPI für Polymerforschung, Mainz (09.08.2012)
- Prof. Dr. Alexander Filippov, Donezk, Institute for Physics and Engineering, National Academy of Science, Ukraine, Gastwissenschaftler und Vortrag (15.08-15.09.2012)
- Clemens Schaber, Universität Wien (14.08.2012)
- Dr. Yael Politi, MPI für Kolloid und Grenzflächenforschung, Potsdam (04.10.2012)

- Dr. Thomas Hörnschemeyer, Universität Göttingen (08.10.2012)

II.4.7 Preise und Auszeichnungen

- iF Goldaward 2010 im Bereich Materialien für Gecko-Tape, Verliehen an Prof. Stanislav Gorb und Binder GmbH auf CeBit, Hannover (01.03.2011)
- Wissenschaftstransferprämie für Gecko-Tape durch die Innovationsstiftung Schleswig-Holstein (04.07.2011)
- Best of Award für Gecko-Tape, 9. Materialica Design + Technology Award 2011, München (18.10.2011)

Kiel, 22. März 2013

Prof. Dr. Stanislav N. Gorb