Bionik - Wandelbare Strukturen:



Von Marie-Claire Graf 3Bb Maturarbeit 2015 Gymnasium Liestal

Betreuungsperson: von Weymarn Constantin

Inhaltsverzeichnis

1	Zusa	usammenfassung3			
2	Einl	eitung	4		
3	Gesc	chichte und Definition der Bionik	6		
_	3.1	Kurze Geschichte der Bionik			
	3.2	Definition und Arbeitsweise der Bionik			
	3.3	Zehn Grundprinzipien der Bionik			
1		nische Erfindungen: Fliegen wie Vögel, schwimmen wie Fische, bauen wie			
T		Insekten			
	4.1	Rau ist schneller als glatt - Haifischhaut			
	4.2	Immer perfekt sauber und selbstreinigend – Lotuseffekt			
	4.3	Fest verzahnt - Klettverschluss			
	4.4	Steht auf jedem Tisch – Salzstreuer			
	4.5	Nach Vorbildern des Kofferfischs – Bionic car			
	4.6	Künstliche Fotosynthese - Grätzelzelle			
		•			
5		orie zur praktischen Arbeit			
		Arthropoden - Die heimlichen Herrscher der Erde			
	5.1	8			
	5.1	.2 Biologie und Anatomie	19		
	5.1	.3 Aufbau des Exoskeletts	20		
	5.1	.4 Muskulatur	24		
	5.1	.5 Sensorik	25		
	5.2	Bewegungsmechanismen der Arthropoden	26		
	5.2	0 0			
	5.2	2.2 Passive Bewegungsmechanismen der Arthropoden	27		
	5.2	2.3 Hydraulik als Bewegungsmechanismus	28		
	5.2	2.4 Bewegliche Systeme	34		
6	Mate	Material und Methoden			
	6.1	Untersuchungsmaterial			
	6.2	Vorbereitung			
	6.3	Makrofotografie			
	6.4	Mikroskopie			
	6.5	Lichtmikroskopie			
	6.6	Rasterelektronenmikroskopie (REM)			
	6.7	Atomic Force Microscope (AFM)			
_		• ` `			
7		ultate			
	7.1	Europäische Wanderheuschrecke und Wüstenheuschrecke (weiblich)			
	7.2	Spinnen, am Beispiel der Erdfinsterspinne			
	7.3	Krebstiere am Beispiel der Nordseegarnele			
	7.4	Geisselantenne der Heimchen	63		
	7.5	Honigtopfameise, Wander- und Weberameise, allg. Arbeiterinnenameise mit			
		Aufgabe der Nahrungssuche			
	7.6	Termiten- und Ameisenkönigin			
	7.8	Libelle			
	7.9	Deckelschlüpfer am Beispiel der Schmeissfliege			
	7.10	Schwarzer Kiefernprachtkäfer	75		

8 Inte	erpretation - Diskussion - Schlussfolgerung	78
8.1	-	78
8.2		81
	Schlussfolgerung	
9 An	wendung	83
9.1		83
9.2	Robotik	86
9.3	Weitere Anwendungen	87
10 E	Danksagung	90
11 (Quellenverzeichnis	92
11.1	1 Literaturverzeichnis	92
11.2	2 Internetverzeichnis	95
11.3	3 Abbildungsverzeichnis	98
Anhai	ng	101

1 Zusammenfassung

Ausgangspunkt für die Maturarbeit bilden folgende Leitfragen: Welche hydraulischen Mechanismen haben Arthropoden entwickelt, um sich zu bewegen? Wie sind ihre Gelenke aufgebaut und wie funktioniert das Zusammenspiel von Funktion, Form, Struktur, Material und Mechanik? Welche Aspekte sind für die Technik interessant?

Anhand von umfangreichen Literaturrecherchen und wissenschaftlichen Untersuchungen wie Makrofotografie, Lichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Atomic Force Microscope (AFM) konnte bei verschiedenen Arthropodenarten wie der Europäischen Wander- und Wüstenheuschrecke, der Erdfinsterspinne, dem Heimchen und der Nordseegarnele aufgezeigt werden, dass für ihre Beweglichkeit ein gut aufeinander abgestimmtes Zusammenwirken von festen und flexiblen Strukturen nötig ist. Die unterschiedlichsten Bedürfnisse der Beweglichkeit werden durch die vielseitig und multifunktional eingesetzte Hydraulik abgedeckt, wobei dafür oft die eigene Körperflüssigkeit diese Funktion übernimmt.

Bewegungsstudien und Makrofotografie der untersuchten Arthropoden lieferten essentielle Informationen zu Funktion, Form und Struktur der hydraulischen Gelenke.

Lichtmikroskopische Aufnahmen haben die ersten Erkenntnisse bestätigt und gut ersichtlich wurde das komplexe Zusammenwirken von festen Strukturen, den Skleriten, sowie den flexiblen, den Membranen.

Mit REM-Bildern konnte sowohl die Struktur und Form der Membran verdeutlich werden, als auch die Funktion und Mechanik ihrer Beweglichkeit.

Aus den gewonnenen Einsichten werden Anwendungen für die technische Umsetzung in der Robotik und der Architektur skizziert. In beiden Branchen sind die bionischen Untersuchungen zu den hydraulischen Mechanismen der Arthropoden von zentraler Bedeutung. Es könnte dabei eine qualitativ neue Generation von technischen Innovationen entstehen.

Zusammenfassen kann festgehalten werden, dass ein hydraulischer Mechanismus bei Arthropoden nur möglich ist, wenn sie beweglich sind und ein hydraulisches System besitzen. Das Zusammenspiel dieser beiden Gegebenheiten ermöglicht hydraulisch unterstütze Bewegungsabläufe.

2 Einleitung

Seit Jahrmillionen entwickelt die Natur biologische Strukturen und Funktionen immer weiter, lässt aussterben, generiert Neues und strebt das Ideal an. "Survival of the fittest", dies erkannte bereits *Charles Darwin* auf seinen Expeditionen. Die Natur experimentiert und lässt nur die besten Gene überleben. Durch diese natürliche Selektion optimiert sie sich selbst und entwickelt sich weiter. Aus menschlicher Sicht erscheint die Natur hart und gnadenlos, nur die am besten angepassten Lebewesen überleben.

Die Natur hat es geschafft, aus einer Handvoll chemischer Elementen eine genetische Vielfalt zu entwickeln, die sich in der unüberblickbaren Fülle an Arten wiederspiegelt. Die ca. 1.5 Millionen Tiere und rund 0.5 Millionen Pflanzenarten, welche bis heute beschrieben sind, bilden mit ihren Anpassungen einen riesigen Ideenkatalog für uns.^{1,2,3}

Das Ziel der Bionik ist, diese biologischen Errungenschaften zu erkennen und zu verstehen, systematisch zu nutzen und in marktfähige Produkte umzuwandeln. In der heutigen wirtschaftlichen Lage, wo es darum geht, mit Ressourcen sparsam umzugehen und dabei innovative und nachhaltige Produkte auf den Markt zu bringen, sollte es von Interesse sein, die bereits vorhandenen Vorbilder der Natur zu verwenden. Dabei kann die Bionik vom beachtlichen Wirkungsgrad der Natur profitieren: Sie agiert mit dem Minimum-Maximum-Prinzip, das heisst, sie versucht bei einem Minimum an Material und Energie ein Maximum an Funktionalität und Zuverlässigkeit zu erreichen.⁴ Des weitern ist zu beachten, dass der Ideenpool uns gratis zur Verfügung gestellt wird. Dabei möchten die BionikerInnen die Natur nicht einfach kopieren, sondern im Sinne der Evolution, dem Zweck entsprechende Anpassungen generieren. Gemäss dem Gesetz der Natur, weniger ist mehr, kreiert die Natur nach folgenden vier Prinzipien: sparsam, nachhaltig, leistungsfähig und funktionstüchtig. Diese Grundsätze sind so überzeugend, dass sie faszinieren. Oft sind die Lösungen in der Natur deshalb auch einfach und genial. Die Natur entwickelt sich kontinuierlich weiter und verbessert sich. In ihrem Netzwerk ist alles passend aufeinander abgestimmt und harmonisiert.

Der menschliche Erfindergeist hat schon früh entdeckt, dass die Natur geniale Vorbilder und Ideen geschaffen hat, wie ich im Kapitel 3.1 Kurze Geschichte der Bionik und 4. Bionische Erfindungen näher erläutern werde. Ein Leben ohne Flugzeuge und Schiffe, ohne Reiss- und Klettverschluss, sowie ohne Hochhäuser ist für uns undenkbar. Für all diese Erfindungen diente die Natur als Vorbild. Wie bereits angetönt ist das Themengebiet der Bionik genau so unerschöpflich und riesig wie die Vielfalt der Natur. Entsprechend der grossen Vielfalt an Funktionen, Strukturen und Abläufen hat die Bionik auch ein breites Anwendungsgebiet. Das Interesse ist nicht nur bei naturwissenschaftlichen Forschern, Ingenieuren, Konstrukteuren, Architekten und Designern vorhanden, sondern auch im Management, Marketing, der Organisationsentwicklung sowie in der Kommunikationsforschung.

Mit einem Lebensstil gegen die Natur, anstatt mit ihr, schaffen wir uns Probleme. Wo der Mensch die Natur aus der Balance wirft, sind die Folgen keineswegs vorteilhaft für uns.

¹ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 5

² www.wikidepia.org/wiki/Artenvielfalt

³ Natur und Museum 136 (Heft 5/6), 2-Millionen-Grenze erreicht, S. 131-134

⁴ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 2

Die Vertiefung in bionische Gedanken ist eine Möglichkeit, die Natur besser zu verstehen, ihre Abläufe kennen zu lernen und diese zu respektieren. Denn nur was man kennt, kann man artgerecht behandeln.

Die Bionik ist heute noch nicht sehr bekannt. Die Bekanntmachung dieser Wissenschaft und ihr Beitrag zu unzähligen Problemlösungen ist sehr wichtig. Erfolgversprechend ist die Bionik, wenn interdisziplinär gearbeitet wird, d.h. wenn Forschungsteams und Wirtschaftsvertreter zusammen eine Fragestellung behandeln und gemeinsam eine Lösung suchen. Eine ganzheitliche Betrachtung ist erforderlich, um aus dem enormen Potential die passende Umsetzung zu finden. Durch die Globalisierung wird der Innovationsdruck verstärkt, da immer mehr und schneller erfunden wird. So kommt es gelegen, dass die Bionik bereits innovative Inspirationen liefert.

Ein bedeutender Begriff der Bionik ist die Multifunktionalität. Das Abwägen zwischen Generalisieren und Spezialisieren ist äusserst wichtig. In der Natur können zu spezialisierte Errungenschaften bei Änderung der Umwelt zum Tod der Art führen. Hingegen können Generalisten von den Spezialisten verdrängt werden, hier sind Kompromisse gefragt.⁵ Weiter ist die Selbstorganisation, sowie die Selbstregeneration ein grosser Pluspunkt der Natur. Auch nutzt die Natur gratis Umweltenergien wie Solar-, Wind-, Wasser- und Gravitationsenergie. Können diese Aspekte mittels der Bionik in die Technik umgesetzt werden, hat die Technik einen enormen Schritt nach vorne gemacht. Erfolg bedeutet in der Natur, lebenstüchtiger zu sein als die Konkurrenz, seine Gene in möglichst grosser Zahl weiter zu geben, sich in verschiedenen Lebensräumen und mit verschiedenen Lebensbedingungen zu Recht zu finden und diese zu besiedeln.

Motivation: Oft werde ich gefragt, wieso ich mich für Bionik interessiere, was das genau sei und was daran so spannend ist. Aus meiner Sicht ist die Bionik eine geniale und vielfältige Problemlöserin. Ich liebe die Natur und bin fasziniert von der grossen Vielfalt und feinen Ausdifferenzierung ihres Angebots - und dies seit ich klein bin. Ich fragte mich oft, warum eine Pflanze oder ein Tier genau so aussieht und nicht anders. Gut erinnern kann ich mich noch daran, als mein Bruder und ich als Kinder Ahornsamen gesammelt hatten und diese in die Luft warfen. Wer es auch schon probiert hat weiss, dass sie sich wie ein Propeller schnell drehen und so ganz langsam und sanft zu Boden gleiten. Die Frage warum es sich dreht und wozu er fliegt stellte ich mir damals noch nicht. Doch seit einiger Zeit beschäftigt mich das Warum sehr und dies weit über die propellernden Ahornsamen hinaus. Wie sind all die Wunder der Natur nur möglich?

In meiner Maturarbeit möchte ich ein noch weitgehend unerforschtes Teilgebiet der Bionik erforschen: Ich versuche herauszufinden, wie Gliederfüssler (Arthropoden) mit schnellen hydraulischen Volumenvergrösserungen umgehen können, wie sie sich mit ihrem starren Chitinpanzer bewegen und welche Mechanismen sie als Lösung entwickelt haben. Weiter interessiert mich, wie man diese Vorbilder der Arthropoden für unseren Gebrauch nutzen könnte und wo die Grenzen der Umsetzung liegen. Gleichzeitig möchte ich mit den Beispielen Andere motivieren, sich in diese Wunderwelt zu begeben, um praktische Möglichkeiten zu entdecken und sich inspirieren zu lassen. Das Tierreich der Arthropoden ist ein gutes Beispiel für all die von der Natur geschaffenen Errungenschaften.

⁵ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 5

3 Geschichte und Definition der Bionik

Es folgt ein kurzer geschichtlicher Abriss am Beispiel herausragender Persönlichkeiten (3.1), die Definition und Arbeitsweise der Bionik (3.2), sowie die Darstellung der zehn Grundprinzipien, gemäss welchen Anwendungen für den Menschen entwickelt werden (3.3).

3.1 Kurze Geschichte der Bionik

Der Anfang der 'bionischen' Betrachtungsweise stammt wohl von *Heraklit,* einem griechischen Philosophen. Er behauptete, "dass der Mensch schöpferisch gestalten kann, indem er hinhört auf die Natur".6

Weiter ging es im Jahre 1500 als das Universalgenie *Leonardo da Vinci* u.a. diverse Flugobjekte analysierte, welche er in der Natur entdeckte. Er erstellte unzählige Studien und fertigte Unmengen von Skizzen, Zeichnungen und Schriften an (Werk: *Codice sul volo degli uccelli, Florenz 1505*).⁷ So untersuchte *Leonardo* die Anatomie der Vogel- und Fledermausflügel und deren Flugverhalten (Abb. 1), sowie die Flugsamen verschiedener Pflanzen. Zuerst war es mehr eine Kopie der biologischen Vorbilder, doch entstanden später die ersten Skizzen und Pläne für Flugflügel, Schlagflügelapparate sowie Fallschirme.⁸ Einige Flugobjekte baute und testete er gleich selbst, die Flugversuche scheiterten jedoch (Abb. 5).⁹ Schnell lässt sich erkennen, dass *Leonardo* die Natur als Vorbild diente. Kein Wunder, dass er heute als historischer Gründervater der Bionik gilt. Auf den zwei folgenden Bilderreihen ist die Entwicklung von Flugzeugen und Helikoptern aufgrund Skizzen von Leonardo da Vinci dargestellt.



Abb. 1: Skizzen des Vogelfluges

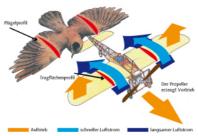


Abb. 2: Analyse der Tragfähigkeit der Vogelflügel



Abb. 3: Flugzeug



Abb. 4: Windungen des Schneckenklees



Abb. 5: Skizze eines Flugapparates



Abb. 6: Lasthelikopter mit doppeltem Rotor

⁶ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 71

⁷ http://de.wikipedia.org/wiki/Kodex_über_den_Vogelflug

⁸ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 69

⁹ http://de.wikipedia.org/wiki/Kodex_über_den_Vogelflug

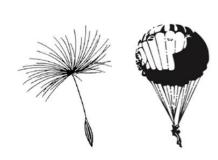


Abb. 7: Flugsamen des Wiesenbockbarts und Fallschirm

100 Jahre später stellte Borelli weitere Modellexperimente zum Flugverhalten von Vögeln dar. 10 Ende des 18. Jahrhunderts entwickelte Sir G. Cavlev nach dem Vorbild der Flugsamen des Wiesenbockbarts einen Fallschirm mit einem tiefgelegenen Schwerpunkt (Abb. 7). Somit ist er der Erste, welcher eine biologische Struktur erfasste und durch Weiterentwicklung und Kreativität erfolgversprechenden Produkt umsetzten konnte.^{11,12} Das Interesse an bionischem Wissen über Flugkörper war vor allem im und nach dem Ersten Weltkrieg enorm gross.

In den Anfängen waren die Pioniere so stark beeindruckt von der Natur, dass sie das Vorbild kopierten. Josef Paxton, ein weiterer Pionier der Bionik, studierte die radiale Verrippung der Blätter der Riesenseerose (Victoria regia) und konstruierte, basierend auf diesen Verstrebungen, den Londoner Kristallpalast.¹³

Erst im letzten Jahrhundert verstand die Forschung ihre Arbeit neben dem Beobachten und Verstehen vor allem im anschliessenden Abstrahieren. So wird beispielsweise die Konstruktion der sechseckigen Bienenwabe nicht nur in der Architektur umgesetzt, sondern für die Herstellung von Ziegeln, Waschtrommeln oder Autopneus übernommen.

3.2 **Definition und Arbeitsweise der Bionik**

John E. Steele, ein amerikanischer Major, verwendete das Wort 'bionics', als Wortspiel zwischen biology und technics, erstmals Ende der sechziger Jahre. 14 Damit kommt das Wesentliche zum Ausdruck: Die Bionik holt sich Ideen und Anregungen aus der Biologie und setzt sie in der Technik um. D.h. sie beschäftigt sich in der Grundlagenforschung mit den durch die Evolution optimierten Strukturen, Verfahren und Konstruktionen, erfasst danach deren Entwicklungsprinzipien und wandelt diese Errungenschaften innovativ in technische Anwendungen der angewandten Forschung um (Abb. 8). Auch wenn der Begriff Bionik noch jung und unbekannt ist, so sind vereinzelte Anwendungen schon seit Jahrhunderten bekannt. Aus heutiger Sicht der Bionik sollte die Natur keinesfalls nur kopiert werden.¹⁵

¹⁰ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 13

¹¹ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 14

¹²http://www.bionikzentrum.de/page_druck.asp?navA=bionik&navB=geschichte&navI D=3&editable=1

¹³ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 69

¹⁴ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 7

¹⁵ http://de.wikipedia.org/wiki/Bionik

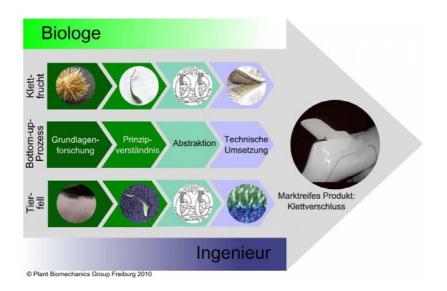


Abb. 8: Arbeitsweise der Bionik am Beispiel des Klett-Verschlusses

Der renommierte Prof. emerit. Dr. rer. nat. Werner Nachtigall ist Gründer der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik und des Studienprogramms Technische Biologie und Bionik, Autor von ca. 300 Originalpublikationen und über 30 Büchern sowie Träger diverser Preise und weltweit einer der bedeutendsten Promotoren der Bionik. Ihm gelang es einerseits das bionische Wissen in die Gesellschaft zu bringen, andererseits die Bionik als interdisziplinäre Wissenschaft zu etablieren. Ziel ist es, die verschiedenen Disziplinen zusammen zu bringen, dadurch voneinander zu lernen und gemeinsam sinnvolle Lösungen zu finden. 16, 17, 18 Dank dem Engagement von Prof. Nachtigall kann Bionik heute v. a. in Deutschland und den USA studiert werden.

Die Bionik umfasst nach W. Nachtigall drei Grunddisziplinen: Konstruktionsbionik (z.B. Materialbionik), Verfahrensbionik (z.B. Baubionik) und Entwicklungsbionik (z.B. Organisationsbionik).19

¹⁶ Bionik in Beispielen, Werner Nachtigall, Autoren

¹⁷ http://de.wikipedia.org/wiki/Werner_Nachtigall

¹⁸ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 9

¹⁹ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 11

3.3 Zehn Grundprinzipien der Bionik

Angepasst an meine Maturarbeit folgen aus dem Buch von *Werner Nachtigall* 'Bionik – Lernen von der Natur' die zehn Grundprinzipien der Bionik (S. 73 – 83).

1. Integrierte statt additive Konstruktion

Das Exoskelett des Abdomens der gewählten Arthropoden besteht nicht aus verschiedenen einzelnen abgegrenzten Teilen, sondern agiert als ein zusammenhängendes System. Auch der Grundstoff des Baumaterials ist immer gleich.

2. Optimierung des Ganzen statt Maximierung eines Einzelelements

Durch das Ausdehnen des Abdomens erhalten die Arthropoden einerseits mehr Platz, andererseits verlieren sie ihren Schutz. Es macht keinen Sinn, einzelne Teile zu maximieren, sondern das funktionierende System der Dehnbarkeit des Abdomens muss in den übergeordneten Zusammenhängen funktionieren, auch wenn einzelne Teile nicht perfekt sind. Es macht keinen Sinn einen übermässigen Aussenpanzer mitzutragen, um in allen Fällen geschützt zu sein.

3. Multifunktionalität statt Monofunktionalität

In der Natur haben die meisten Elemente eine Vielzahl von Aufgaben, dies im Gegensatz zur Technik. So ist zum Beispiel das Chitin der Arthropoden leicht, äusserst stabil und schwer zerstörbar. Je nach Funktion kann es in elastischer oder ausgehärteter Form auftreten. Dieser multifunktionale Baustoff stabilisiert als Exoskelett den Körper, schützt vor Umwelteinflüssen, lässt den überlebenswichtigen Wasserdampf austreten und verhindert gleichzeitig das Eintreten von infektiösen Wassertropfen.

4. Feinabstimmung gegenüber der Umwelt

Die Lebewesen sind passend an ihre Umwelt abgestimmt, so auch die gewählten Arthropoden. Mit dem segmentierten Hinterleib haben sie sich optimal an die gegebenen Bedingungen angepasst. Zur Verdeutlichung ist der Hinterleibstachel der weiblichen Wüstenheuschrecken zu erwähnen, mit welchem sie ihre Eier tief in den feuchten Sand legen.

5. Energieeinsparen statt Energieverschleuderung

Alle Organismen besitzen einen bestimmten Energievorrat, mit welchem sie eine bestimmte Leistung in bestimmter Zeit erbringen. So trägt die Termitenkönigin in ihrem ausgedehnten Abdomen die Eier und wird nur während dieser Zeit von Arbeiterinnen mit Nahrung versorgt, so dass sie ihre gesamt Energie für die Eierproduktion aufwenden kann. Nachdem sie die Eier gelegt hat, faltet sie das Abdomen zusammen und muss sich die Nahrung wieder selber suchen.

6. Direkte und indirekte Nutzung erneuerbarer Energien

Die beinahe unbegrenzt zur Verfügung stehende Sonnenenergie sollte wenn immer möglich genutzt werden. Arthropoden nutzen diese als Energielieferant, indirekt über das Nahrungsmittel (Photosynthese) und zur Fortbewegung (z.B. Wind). Auch die Hydraulik stellt eine erneuerbare Energiequelle dar.

7. Zeitliche Limitierung statt übermässige Haltbarkeit

Für Langlebigkeit wird heutzutage Material-, Energie- und Zeitverschleiss in Kauf genommen. Eine übermässige Haltbarkeit resp. Langlebigkeit steht im Kontrast zur Innovation und Weiterentwicklung. Da sowohl die Natur als auch die Gesellschaft sich immer weiterentwickeln, ist das Bestreben der Langlebigkeit gar nicht notwendig. Die Arthropoden haben kein Bedürfnis für die Ewigkeit zu Bestehen oder etwas zu Hinterlassen ausser ihren Nachkommen.

8. Totale Rezyklierung statt Abfallanhäufung

Die Natur produziert keinen Abfall! Das ist wohl das wichtigste der Gesetzte und der Grund, weshalb die Natur uns überdauern wird. Alles was die Arthropoden benötigen, nehmen sie von der Natur (Wachstum, Entwicklung und Fortpflanzung) und geben es nach dem Tod wieder zurück (Destruktion). So schliesst sich der Kreislauf und Endprodukt ist wieder Anfangsprodukt.

9. Vernetzung statt Linearität

Die Natur kann nur durch ihre unglaublich komplexe Vernetzung bestehen. So sind die staatenbildenden Termiten und Ameisen in ihrem Bau perfekt organisiert (Staatengesellschaft). Im Ökosystem ist eine darüber hinausgehende Vernetzung zwischen verschiedenen Arten innerhalb von Nahrungsketten und Symbiosen gegeben. Bereits *Frederic Vester* hat diese Vernetzung in seinem Buch "Der Wert eines Vogels" einfach veranschaulicht (Kösel-Verlag, 1996).

10. Entwicklung im Versuchs-Irrtums-Prozess

Für die Bionik ist es wesentlich, die Evolutionsschritte und deren Methoden zu untersuchen (Evolutionsstrategien) und nicht nur das aktuelle Produkt zu betrachten.

4 Bionische Erfindungen: Fliegen wie Vögel, schwimmen wie Fische, bauen wie Insekten

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Beispiele der Bionik mit ihrem natürlichen Vorbild sowie der technischen Umsetzung beschrieben.

4.1 Rau ist schneller als glatt - Haifischhaut

Leonardo da Vinci beobachtete auch die Meereswelt und konstruierte nach Forellengestalt einen strömungsgünstigen, spindelförmigen Schiffskörper.²⁰

Weiter musste der Wasserwiderstand der englischen Galeonen um 1576 verringert werden. Es wurden schnellere, stabilere und wendigere Schiffe basierend auf Studien der Strömungsanpassung von Meeresfischen konstruiert. Diese Naturbeobachtungen waren wichtig für die englische Vorherrschaft auf hoher See.^{21,22,23,24}

Lange war man der Überzeugung, dass eine glatte Oberfläche den geringsten Widerstand aufweist. Aufgrund von meeresbiologischen Untersuchungen der Haifischhaut konnte man dies widerlegen und bemerkte, dass die Natur eine bessere Lösung hat. Die Haut besteht aus vielen winzigen, übereinanderliegenden, speziell gerillten Schuppen, welche viel aquadynamischer ist als eine glatte Oberfläche. Anwendung dieser Schuppenhaut findet man beim Schiffsbug, wodurch die Schiffe viel effizienter und umweltfreundlicher fahren. Im Test konnte eine Treibstoffreduktion von 5 % nachgewiesen werden. Ein weiterer positiver Effekt besteht darin, dass die Algen und Seepocken sich auf dieser strukturierten Bugoberfläche nicht mehr anhaften können, was weiter zu einer Widerstandsverringerung führt. Diese Haifischhautfolien resp. -lacke lassen sich auch bei Flugzeugen und Windrädern anwenden. Pedern der Vögel und Schuppen der Schmetterlinge haben die gleichen Effekte.

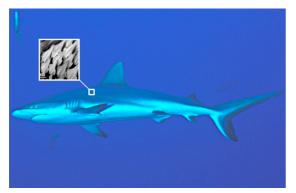


Abb. 9: Haifischhaut als bionisches Vorbild mit verbessertem Strömungsverlauf



Abb. 10: Schiffslack der Firma VOSSCHEMIE nach der Hautstruktur des Haifisches

²⁰ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 57

²¹ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 16

²² http://www.mhs.ox.ac.uk/staff/saj/thesis/baker.htm

²³ http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2008/3614/pdf/080728 Disse2 A5.pdf

²⁴http://www.bionikzentrum.de/page_druck.asp?navA=bionik&navB=geschichte&navI D=3&editable=1

²⁵ http://www.bionikzentrum.de/default.asp?navA=newsdetail&main=news&newsid=210

²⁶ http://www.focus.de/digital/computer/chip-exklusiv/tid-10233/bionik-von-haifischhaut-inspiriertes-hightech_aid_306681.html

²⁷ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 63-65

4.2 Immer perfekt sauber und selbstreinigend – Lotuseffekt

Im Buddhismus gilt die Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera* – Indische Lotusblume) als Symbol der Reinheit. *Nelumbo* wächst im Sumpf, ihre Blätter reinigen sich unter geringem Wassereinfluss von selbst und sind deshalb immer sauber. *Barthlott* und *Neinhuis* konnten 1997 eine spezielle Oberflächenstruktur erkennen (Abb. 11), welche den Schmutz abweist. Diese Mikrostruktur, welche die Oberfläche bedeckt, besteht aus ca. 15 µm grossen Noppen aus Wachskristalloiden. Diese bewirken, dass der Wassertropfen die Schmutzpartikel aufnimmt und abtransportiert. Wenn die Adhäsionskräfte des Wassertropfens stärker sind als die Haftung an der Blattoberfläche, dann reinigt sich diese von selbst. Bei einem glatten Untergrund rollt hingegen der Wassertropfen über die Partikel, die Oberfläche bleibt schmutzig (Abb. 13). Die Firma *Sto* entwickelte eine Fassadenfarbe namens *Lotusan*, welche selbstreinigend ist.^{28,29,30,31}

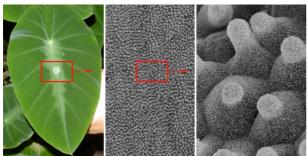


Abb. 11: Noppenstruktur der Lotusblätter

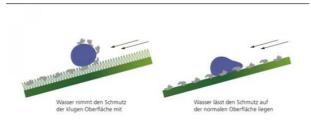


Abb. 13: Links Lotuseffekt, rechts: normale Oberfläche



Abb. 12: Lotusan, die selbstreinigende Fassadenfarbe

_

²⁸ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 30-33

²⁹ http://www.lotusan.de/de/produkte-mit-lotus-effect/produkte-mit-lotus-effect/produkte-lotus-effekt.htm

³⁰ http://www.bionik-online.de/wp-content/uploads/2012/05/Lotus_01_Info1.pdf

³¹ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 159

4.3 Fest verzahnt - Klettverschluss

Der weltweit erfolgreichste Verschluss hat seinen Ursprung in der Natur. Der Schweizer *Georges de Mestral* ging mit seinem Hund auf die Jagd und ärgerte sich über die lästigen Kletten, die sich immer in seinen Hosen und im Hundefell tief verhakten. Er wunderte sich über diese Kraft und schaute sich die Kletten unter dem Mikroskop an. Er entdeckte tausende kleiner Häkchen. Als Ingenieur und Erfinder erkannte er das Potenzial dieses genialen Verschlusssystems und patentierte 1951 das Produkt *Velcro*® (franz. *velour /* Bast und *crochet /* Haken). Es besteht aus zwei Bändern, einem elastischen Haken- und einem Schlingenband, genau nach dem Vorbild der Natur. 32, 33 Die einfache Handhabung und Montage, die geringen Materialkosten, die schnelle, einfache, nachhaltige und günstige Produktion, das breite Einsatzgebiet, das robuste und zuverlässige System machen den Verschluss zu einem der bekanntesten Bionik-Produkte. 34,35,36





Abb. 14: Kletten haften an Gewebe

Abb. 15: Velcro® mit dem Haken- und Schlingenband

³² Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 21-22

³³ http://blog.alumni.uni-oldenburg.de/?p=1107

³⁴ http://www.velcro.de

³⁵ http://www.velcro.de/index.php?id=14

³⁶http://www.bionikzentrum.de/page_druck.asp?navA=bionik&navB=geschichte&navI D=3&editable=1

4.4 Steht auf jedem Tisch – Salzstreuer

Der Münchner Biologe *R. H. Francés* überlegte, wie er seine Kleinstlebewesen für Versuchszwecke völlig gleichmässig aussträuen könnte, alle vorhandenen Methoden versagten. Da entdeckte er in der Natur eine Lösung für sein Problem, die Mohnkapsel. Diese besitzt unter dem Kapselrand eine Vielzahl von Öffnungen, welche für eine gleichmässige Aussaht der Tiere bestens geeignet sind. So konnte *Francés* einerseits seine Aussaat machen und entwickelte diese Idee zum 'Streuer für Haushalt und medizinische Zwecke' weiter, welchen er im Jahr 1920 patentieren liess. Der Salzstreuer wurde noch verändert, so dass die Löcher auf der Oberseite sind, was eine einfachere und sauberere Handhabung ermöglicht.^{37,38}







Abb. 16: Reife Mohnkapsel

Abb. 17: Salzstreuer für eine gleichmässige Dosierung

³⁷ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 19-20

³⁸ http://blog.alumni.uni-oldenburg.de/?p=1107

4.5 Nach Vorbildern des Kofferfischs – Bionic car

Mercedes-Benz war auf der Suche nach einer Idealform für ein aerodynamisches und somit treibstoffarmes Auto. In Zusammenarbeit mit der Universität Saarbrücken wurden Tiere mit möglichst geringem Luft- resp. Wasserwiderstand gesucht. Neben Pinguinen und Schwalben wurde der Kofferfisch (*Ostraciidae*) als Vorbild getestet. Der Kofferfisch generierte extrem niedrige c_w-Werte (Strömungswiderstandskoeffizient) von 0.19 und bot dadurch die besten Voraussetzungen für ein geräumiges, treibstoffsparendes und komfortables Auto. So wurde der *bionic car* in Zusammenarbeit von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern entwickelt.^{39,40,41}





Abb. 18: Voluminöser Kofferfisch als aquadynamisches Vorbild für Automobilindustrie

Abb. 19: Bionic car von Mercedes-Benz leicht und energieeffizient

³⁹ Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 33-36

⁴⁰ http://de.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_bionic_car

⁴¹ http://www.daimler.com/dccom/0-5-1276316-1-1525347-1-0-0-1320821-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0.html

4.6 Künstliche Fotosynthese - Grätzelzelle

Ein bis jetzt noch ungelöstes bionisches Problem ist die künstliche Fotosynthese. Trotz der einfachen Summengleichung ist es bisher noch niemandem gelungen die komplexen Vorgänge eines photosynthtisch aktiven Blatts nach zu bauen.⁴²

Der ETH-Forscher *Prof. Michael Grätzel* entwickelte bereits in den neunziger Jahren eine Farbstoffsolarzelle, welche für die Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie nicht ein Halbleitermaterial braucht, sondern einen organischen Farbstoff. Dazu setzte er u.a. Chlorophyll ein, so dass sein Vorgang als technische Fotosynthese bezeichnet werden kann. Die Inspiration für seine Patentierung hatte er aus der Natur, und obwohl die Funktionsweise noch immer nicht in allen Details geklärt ist, funktioniert sie. Er arbeitet mit seinem Team immer noch an der Optimierung seiner Solarzelle, die mit einem Wirkungsgrad von 12.3% als sehr gut zu bezeichnen ist. Dabei gilt es die Langzeitstabilität seines Elektrolyten zu gewährleisten. Diese bionische Erfindung hat nicht nur niedrige Herstellungskosten, sondern ist auch mit geringen Umweltbelastungen bei der Herstellung verbunden.^{43,44}





Abb. 20: Fotosynthese – Die Sonne liefert Energie für die Pflanzen

Abb. 21: Grätzelzellen beim Swiss Convention Center der EPFL in Lausanne

⁴² Bionik – Lernen von der Natur, Werner Nachtigall, S. 38-40

⁴³ http://de.wikipedia.org/wiki/Grätzel-Zelle

⁴⁴ http://www.weltderphysik.de/detektor/physik-pur/die-graetzelzelle-eine-solarzelle-fuer-die-zukunft/

5 Theorie zur praktischen Arbeit

5.1 Arthropoden - Die heimlichen Herrscher der Erde

5.1.1 Kurze Einführung

Systematik: Arthropoden (*Arthropoda*, griech.: *arthron*, Gelenk', *pous*, gen. *podos*, Fuss') ist die wissenschaftliche Bezeichnung der Gliederfüssler. Wie der Name sagt, sind die Füsse und der Körper gegliedert. Sie bilden den arten- und individuenreichsten, sowie erfolgreichsten Stamm im Tierreich (Abb. 22). Laien nennen sie oft nur Insekten, doch diese bilden nur eine taxonomisch untergeordnete Klasse im vielfältigen Tierstamm der Gliederfüssler.

Heute noch lebende Arthropoden werden meist in vier grosse Klassen eingeteilt: Spinnentiere (*Chelicerata*), Tausendfüssler (*Myriapoda*), Krustentiere (*Crustacea*) und die Insekten (*Insecta*). Letztere bilden die arten- und individuenreichste Klasse der Gliederfüssler.⁴⁵ Die Einteilung ist jedoch umstritten und variiert stark nach Autor, Jahr und Publikation.⁴⁶ Die Gründe sind der enorme Reichtum der rezenten Individuen, der bereits ausgestorbenen Arten sowie der ständig neu entdeckten Tiere. In der folgenden Graphik ist die enorme Vielfalt der Arthropoden gut ersichtlich.

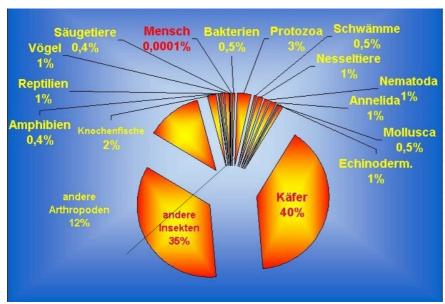


Abb. 22: 87 % der rezenten Tierarten gehören zu den Arthropoden

Evolution: Die ältesten Funde von Gliederfüsslern zeugen von einem Leben seit dem frühsten Kambrium (vor 540 Millionen Jahren). Wissenschaftler gehen davon aus, dass sie vor rund 570 Millionen Jahren aus segmentierten Würmern (Vergleich heutiger Ringelwurm) entstanden sind. Als kleiner Vergleich, die ersten Menschen entwickelten sich vor etwa 1 Million Jahren.^{47,48} In der Evolutionsgeschichte entwickelte sich ein harter Panzer um die Tiere, welcher ihnen Schutz bietet, ähnlich wie bei Häuschenschnecken. Die Urahnen der Arthropoden segmentierten sich in drei Abschnitte: Kopf, Thorax, Abdomen.

48 http://de.wikipedia.org/wiki/Gliederfüßer

_

⁴⁵ Vergleichende Studien zur Gliedmassenentwicklung bei Arthropoden, N. Prpic, S. 9

⁴⁶ http://www.senckenberg.de/root/index.php?page_id=1217

⁴⁷ Urania Tierreich Insekten, K. Günthert, S.14

Artenreichtum: Geschätzte 87% aller Lebewesen sind Arthropoden, heute sind über 1 Million Arthropodenarten beschrieben. Alleine die Klasse der Insekten macht bereits ¾ der rezenten Arten aus! Nach Wikipedia kommen nochmals 10'000 weitere Sechsfüssler (*Hexopoda*), über 100'000 Spinnentiere, 16'000 Tausendfüssler und 50'000 Krustentiere dazu. Die Forscher glauben, dass bisher erst die Hälfte aller Arten entdeckt wurde. Schätzungen besagen, dass es weltweit mehr als 2 Millionen Insektenarten gibt und sie somit die grösste Tierklasse bilden. 10 die 1

Verbreitung: Die Gliederfüssler bewohnen beinahe die gesamte Erde. Ihr enormes Anpassungsvermögen erlaubt es ihnen, alle belebten Bereiche zu besiedeln. Sie sind in der Atmosphäre, auf der Erde und im Wasser (Salz- und Süsswasser) vertreten, sowie in allen Klimazonen: An den kalten Polen, in der Tiefsee, in den trockensten Wüsten sind sie zu finden. Selbst nach verheerenden Katastropen sind sie die Ersten, die wieder vor Ort sind. Einige Vertreter der Gliederfüssler wohnen auch an uns vertrauten Orten, wie in unseren Häusern, Betten oder manchmal sogar auf uns selbst als Parasiten, wo sie nicht gern gesehen werden. Sie richten auch immer wieder riesige Schäden an und sind für Plagen und Seuchen verantwortlich.

Erfolgsrezept: Ein Grund für die überwältigende Vielzahl von Arten und Individuen der Arthropoden ist die extreme Fruchtbarkeit. Weibliche Arthropoden können pro Tag mehrere 100 bis 1'000 Eier legen. Die Rekordhalter sind wahrscheinlich die afrikanischen Termitenköniginnen (*Macrotermitinae*), welche täglich bis zu 15'000 Eier legen!^{53,54} Ein weiterer wichtiger Aspekt für ihren Erfolg ist ihre Anpassungsfähigkeit. Arthropoden sind wie erwähnt überall zu finden.

Schädling und Nutztier: Arthropoden können uns als Schädlinge begegnen: Tropenkrankheiten, die über Mücken übertragen werden, oder Zecken, welche in unseren Wälden leben, sind gefährlich. Weiter wird jährlich etwa 20% der Nahrungsmittel durch schädliche Arthropoden vernichtet. Trotzdem ist eine Welt ohne Gliederfüssler undenkbar.

Sie produzieren für uns: Honig, Seide, Wachs und werden in der Bio-, Pharmakologie, Chemie und Gentechnik als Versuchstiere verwendet.

Weiter leisten sie unbezahlbare Arbeit. Sie lockern den Boden, bilden Humus, sind eine wichtige Nahrungsquelle, entgiften kontraminierte Gebiete und helfen beim Energiefluss sowie Stoffkreislauf der Natur (Destruenten).

Wissenschaft: Bis Ende des 16. Jahrhunders wusste man wenig über die Gliederfüssler. Erst mit der Erfindung des Mikroskops im Jahre 1590 konnten die oft sehr kleinen Tiere bestaunt werden. Seither wird unaufhörlich geforscht und neue Erkenntnisse erweitern das Wissen der Wunderwelt der Arthropoden.

⁴⁹ Kosmos Insektenführer, J. Zahradnik, S. 12

⁵⁰ Insekten Mitteleuropas, M. Chinery, S. 13

⁵¹ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/ H. Weidner, S. 1

⁵² Kosmos Insektenführer, J. Zahradnik, S. 19

⁵³ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/ H. Weidner, S. 2

⁵⁴ Die Ameisen Biologie und Verhalten, Walter Kirchner

5.1.2 Biologie und Anatomie

Bauplan: Der Körper der Gliederfüssler ist, wie der Name sagt und in Abbildung 23 ersichtlich ist, gegliedert in: Kopf (*Caput*), Brust (*Thorax*) und Hinterleib (*Abdomen*). Der Kopf ist wichtig für die Nahrungsaufnahme (Mund), die Orientierung (Sinnesorgane: Antennen, Komplexauge) und die zentrale Steuerung (Nervensystem, Gehirn). Am Thorax sind die Fortbewegungsmittel angebracht wie Beine oder Flügel. Das Abdomen speichert und verarbeitet die Nahrung, umfasst die Geschlechtsorgane und beinhaltet die Atemorgane (Tracheen). Viele Arten besitzen spezialisierte Körperextremitäten wie spezielle Beine, Flügel oder Mundwerkzeuge, welche auf ihre Lebensbedingungen angepasst wurden. Fast alle Arthropoden besitzen eine harte, panzerartige Haut, Aussen- oder Exoskelett genannt. S6, 57,58

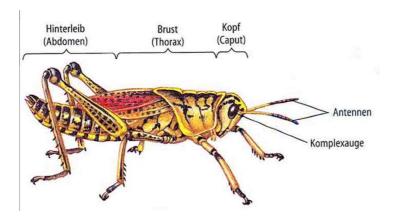


Abb. 23: Bauplan der Arthropoden am Beispiel einer Heuschrecke

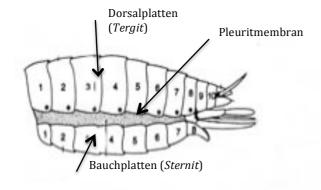


Abb. 24: Verallgemeinerter Bauplan des Abdomens der Arthropoden

Aus Abbildung 24 ist der Aufbau des Abdomens mit den Dorsalplatten (*Tergit*), sowie den Bauchplatten (*Sternit*) und der Pleuritmembran, welche für Bewegung wichtig ist, ersichtlich. Alle steifen Platten werden Sklerite genannt, wobei die Seitenplatten (*Pleurit*) am Abdomen fehlen. Die Sklerite sind röhrenartig ineinander verschachtelt.⁵⁹

⁵⁵ Insekten Mitteleuropas, M. Chinery, S. 15

⁵⁶ Kosmos Insektenführer, J. Zahradnik, S. 6-12

⁵⁷ Die Insekten – Herrscher der Welt, K. Nonomichl, S.10-12

⁵⁸ http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/528076

⁵⁹ The Insects – An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 23

5.1.3 Aufbau des Exoskeletts

Alle Arthopoden besitzen ein Exoskelett (lat. *exo* 'aussen' und griech. *skeltos* 'ausgetrockneter Körper'), bestehend aus einer meist harten Cuticula. Dieser Panzer bietet Stabilität, Stütze, hohe Druck- und Reissfestigkeit, Schutz vor mechanischen und physikalischen Umwelteinflüssen, sowie Chemikalien. Weiter schützt er vor dem Austrocknen. Die Tiere können ihren Wasser- und Gashaushalt durch Sekretion und Transpiration gut regulieren. Die Nachteile sind eine eingeschränkte Beweglichkeit, der grosse Energie-, Materialverbrauch, sowie die Gefahr von Brüchen. Als Vergleich kann man sich eine mittelalterliche Rüstung vorstellen.^{60,61}

Cuticula: Die Cuticula ist eine chemisch höchst komplexe Struktur, welche entweder als Sklerit, oder als biegsam-zähe Membran vorkommt. Diese Membran ist überall von Nutzen, wo die festen Platten bewegt werden müssen. Gelenkmembrane verbinden die harten Sklerite des Gelenks, woduch das Gelenk seine Funktion ausführen kann. Auch Volumenveränderungen sind dank dieser Membran möglich. ⁶² Sinneshaare, Gelenkmembrane, Sehnen, die Innenauskleidung der Atemorgane (Tracheen) und Geschlechtsorgane bestehen ebenfalls aus Cuticula. ⁶³

Aufbau: Das Exoskelett von Arthropoden (Abb. 25) besteht aus mehreren Schichten, welche komplex aufgebaut sind. Die unterste Schicht besteht aus lebenden Zellen und wird Epidermis genannt. Diese besteht aus einer einzelligen Schicht, deren Zellen verschiedenartig differenziert sind. Danach folgt nach aussen die mehrschichtige Cuticula. Diese ist das Ausscheidungsprodukt der Epidermiszellen und somit tot. Sie wird in eine innere, relativ dicke Procuticula (Endo- und Exocuticula) und eine äussere, dünne Epicuticula unterteilt.^{64,65}

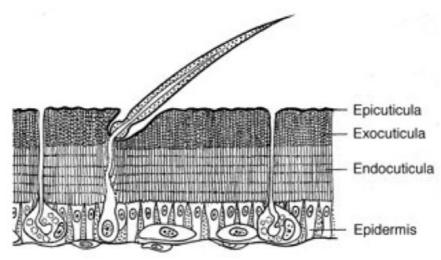


Abb. 25: Aufbau der Arthropoden-Cuticula

60 http://de.wikipedia.org/wiki/Cuticula

⁶¹ https://www.youtube.com/watch?v=xYh5Csdf7lo

⁶² Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/H. Weidner, S. 15-20

⁶³ https://www.youtube.com/watch?v=NoMBSm8KkjI

⁶⁴ Material Properties of Arthropod Cuticles: The Arthropodial Membrane, Hepbure, H.R., Chandler, H.D.

⁶⁵ The Arthropo Cuticle, Neil F. Hardley 1986

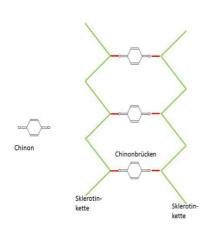


Abb. 26: Chinonbrücken verbinden Sklerotinketten

Procuticula: Die Procuticula (10 μm-0.5 mm) besteht grösstenteils aus Chitin, welches im Kapitel 5.1.3.1 Chitin beschrieben wird. Weiter gibt es eine Vielzahl verschiedenster Proteine. welche ungegerbt wasserlöslich sind. Durch die Gerbung werden die Proteine in das wasserunlösliche, harte, gelbbraune Sklerotin umgewandelt. Mithilfe von Chinonbrücken werden die Sklerotinketten vernetzt. Die äussere Exocuticula ist nach der Gerbung sklerotisiert, also hart und starr (irreversibel). Sie ist die härteste Schicht und deshalb für die Stabilität verantwortlich. Die innere Endocuticula ist meist ungegerbt, deshalb weich und elastisch.

Epicuticula: Den Abschluss des Exoskeletts bildet die dünne Epicuticula (meist 0.1-3 μm), welche kein Chitin enthält. Die Epicuticula verhindert das Austrocknen mittels einer Wachsschicht und bestimmt die Durchlässigkeit der gesamten Cuticula. Diese dünne Epicuticula ist ebenfalls steif und somit mit der Exocuticula für die gesamte Steifheit des Skeletts verantwortlich.^{66,67}

Verbundmaterial: Die Cuticula ist ein Verbundwerkstoff, also eine Kombination aus verschiedenen Stoffen. Die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe, dem Wassergehalt, sowie der Stärke der Sklerotisierung, wirken sich auf die Härte des Panzers aus. So besteht die weiche Cuticula bespielsweise aus etwa 60% Chitin und 40% Sklerotin und die Harte aus ca. 25% Chitin und 75% Sklerotin.⁶⁸ Ist kein Sklerotin in der Cuticula vorhanden, ist die Struktur weich, flexibel und biegsam. Gleichzeitig muss dieser Verbundstoff extrem leicht sein, um den vielfältigen Anforderungen der Arthropoden gerecht zu werden.⁶⁹ Der Nachteil des Verbundstoffes ist, dass er nach einmaliger

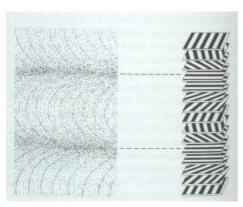


Abb. 27: Strukturierung des Chitins

Sklerosierung die Form behält. Somit müssen Tiere mit Chitinpanzer diesen periodisch abstossen, um zu wachsen. Nach der Häutung pumpt sich das Tier durch Hydraulik auf (s. Kapitel *Hydraulik 5.2.3, In der Natur*) und die äusserste Schicht erhärtet zu einem neuen, grösseren Panzer.^{70,71}

Des weitern ist die Strukturierung und die Lagenschichtung des Chitins äusserst wichtig für die Härte und Beweglichkeit des Exoskeletts. Die Chitinmikrofasern sind leicht versetzt zu der darunterliegenden (Abb. 27).⁷²

⁶⁶ Insekten – Die heimlichen Herrscher der Welt, K. Honomichl, S. 44

⁶⁷ The Insects – An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 16-21

⁶⁸ Insekten – Die heimlichen Herrscher der Welt, K. Honomichl, S. 43

⁶⁹ Design and mechanical properties of insect cuticle, J. Vincent/ U. Wegst

⁷⁰ Pneu und Knochen IL 35 Universität Stuttgart, Otto Frei, S. 146-155

⁷¹ Aufbau und Materialeigenschaften kutikulärer Gelenkstrukturen bei Insekten und ihre funktionale Bedeutung, Diss. Martin Müller, 2008

⁷² The Insects – An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 8-9

Beweglichkeit des Abdomens: In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Beweglichkeit des Exoskeletts gelegt. Die Arthropoden haben ein ausgeklügeltes System, um sich trotz den steifen Skleriten bewegen zu können. Das harte Exoskelett ist zum einen segmentiert und wird des weitern durch weiche, nicht sklerotisierte elastische Membranen (Abb. 28 a,b), dehnbare Chitinschichten, speziellen Proteinbändern mit Resilin (Abb. 28 c) oder Variation von Schichtungen des Chitins zusammengehalten.^{73,74} Je nach Beschaffenheit der Membran (weich, breit, schmal, straff, elastisch) ist eine andere Bewegungsfreiheit möglich.

Diese membranartigen Zonen schützen das Tier nicht optimal. Deshalb kommen sie nur dort vor, wo sie essentiell und gut versteckt sind, so dass die Angriffsfläche möglichst klein ist. Während der Evolution entwickelte sich ein optimales Verhältnis zwischen Schutz und Beweglichkeit.

Damit das Abdomen vielfältig bewegt werden kann, befinden sich die Sklerite nur auf der Rücken- und Bauchseite und sind durch membranöse Zonen, Intersegmentalmembran genannt, verbunden. Um diese empfindlichen Membranen gut zu schützen, überlappen sich die Sklerite wie Dachziegel (Abb. 29) und die Membranen sind darunter eingefaltet.^{75,76}

Ein essentieller Bestandteil des Exoskeletts ist das Integument (Abb. 29). Es erfüllt gleichzeitig gegensätzliche Funktionen, wie z.B.: Schutz vor äusseren Einflüssen, Übermittlung von Sinneseindrücken und wird als Atemorgan benutzt.⁷⁷

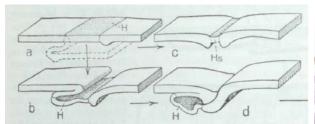


Abb. 28: a) Modell von zwei Skleriten verbunden durch gestreckte Membran

- b) Sklerite verbunden durch eingefaltete Membran
- c) hochelastische Membran zwischen zwei Skleriten
- d) spezialisierte Gelenkmembran

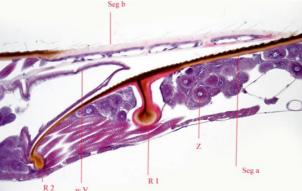


Abb. 29: Mikroskopischer Längsschnitt durch zwei Segmentplatten (Seg a,b) verbunden mit Intersegmentalmembran (wV), R1, R2 sind Integumente

⁷³ Biology of the Arthropod Cuticle, A.C. Neville, S. 2-5

⁷⁴ Insekten – Die heimlichen Herrscher der Welt, K. Honomichl, S. 39-40

⁷⁵ Insekten – Die heimlichen Herrscher der Welt, K. Honomichl, S. 40

⁷⁶ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/ H. Weidner, S. 12-22

⁷⁷ http://de.wikipedia.org/wiki/Integument (Zoologie)

5.1.3.1 Chitin

Abb. 30: Strukturformel Chitin

Chitin (griech. *chiton* ,Hülle', ,Panzer') dient der Strukturbildung. Es ist wie Cellulose ein Polysaccharid, welches sich von diesem nur in der Acetamidgruppe unterscheidet. Da die Chitin-Moleküle langgestreckt und in vielen Schichten angeordnet sind, ist der Stoff äusserst reissfest, jedoch nicht starr. Chitin besteht nur aus den vier Grundelementen der organischen Chemie: Kohlen-, Sauer-, Stick- und Wasserstoff. Desto trotz ist es der Baustein für so vielfältige Verwendungen, wie feinste Flügel- und Stechstrukturen, sowie die soliden Flügeldecken von Käfern. ⁷⁸, ⁷⁹ Gemäss neuen Untersuchungen bestehen z.B. Mundwerkzeuge von Spinnen aus verschiedenen Lagen von Chitin mit unterschiedlichen Fähigkeiten, so dass durch diese Schichtung ein äusserst robuster Verbundwerkstoff entsteht.⁸⁰

5.1.3.2 Resilin

Im Jahre 1960 entdeckte *Weis-Fogh* ein unbekanntes, natürliches Cuticulaprotein, das Resilin. Resilin ist enorm elastisch und kann bis zu der dreifachen Länge gedehnt werden, ohne zu brechen. Viele Gliederfüssler, speziell die Insekten, nutzen diese enormen Eigenschaften für ihre Beweglichkeit. Das Resilin ist Bestandteil der Intersegmentalmembran.^{81,82,83,84,85} *Weis-Fogh* postulierte bereits damals, dass dieses Resilin als Antagonist der Muskulatur zu betrachten ist.⁸⁶

⁷⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Chitin

⁷⁹ http://www.euchis.org

⁸⁰ http://www.wissenschaft.de/leben-umwelt/biologie/-

[/]journal_content/56/12054/3709015/Das-Geheimnis-der-Spinnenklauen/

⁸¹ Solid Biomechanics, R. Ennos, S. 32-37

⁸² Biology of the Arthropod Cuticle, A.C. Neville, S. 141

⁸³ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/H. Weidner, S. 17-19

⁸⁴ The Insects – An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 19

⁸⁵ http://de.wikipedia.org/wiki/Resilin

⁸⁶ Biology of the Arthropod Cuticle, A.C. Neville, S. 17

5.1.4 Muskulatur

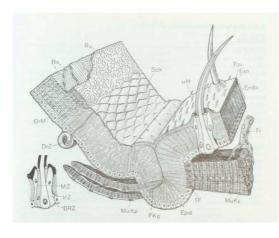
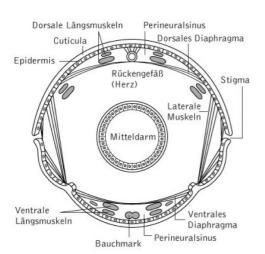


Abb. 31: Verbindung Exoskelett Muskulatur

Aufbau und Funktion: Das Exoskelett und die Muskulatur zusammen bilden den Bewegungsapparat der Arthropoden. Bereits in der Keimentwicklung entstehen die Vebindungen zwischen der Körperdecke und den Skelettmuskeln. Diese bestehen aus quergestreiften Muskelfasern, welche zu Bündeln zusammengefasst sind. Die Epidermiszellen Exoskeletts (Abb. 31, Epid) verbinden sich mit den darunter liegenden Muskeln (MuKz, MuKp). Wird ein Nervenreiz an die Muskeln übertragen, bewegen diese die einzelnen Platten, folglich bewegt es sich.87

Ansatzmöglichkeiten für die Muskulatur sind die Segmentinnenseiten oder deren Fortsätze, welche durch Hauteinstülpungen oder -verdickungen zustande kommen. Die Muskelfasern haften eher an den soliden Platten als an den intermembranen Zonen.⁸⁸



Abdomenmuskulatur: Die steifen Skleritsegmente von Rücken und Bauch werden durch unterschiedliche Muskeln verbunden. Durch Muskelkontraktion und -relaxation kann sich der Körper differenziert bewegen.

Die Arthropoden besitzen eine enorme Vielzahl an Muskeln, bei Heuschrecken wurden 320 Muskelpaare beschrieben, 51 am Kopf, 193 am Thorax und 177 am Abdomen. Dies erlaubt ihnen schnelle und komplexe Bewegungsabläufe.⁸⁹



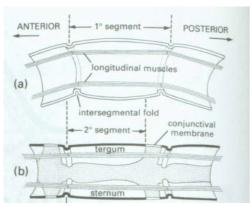


Abb. 33: Längsbewegungen des Abdomens

Die Intersegmentalhäute werden durch die Muskulatur gestreckt und gedehnt, so dass eine Längsbewegung des Abdomens möglich ist. Nebenanstehende Abbildung zeigt in a) die Biegung des Abdomens in Längsrichtung, in b) die Längsstreckung.⁹⁰

⁸⁷ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/H. Weidner, S. 13

⁸⁸ The Insects - An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 22-24

⁸⁹ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/ H. Weidner, S. 39-52

⁹⁰ The Insects - An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 22

5.1.5 Sensorik

Sinnesorgane stellen die Verbindung zwischen dem Organismus und der Umwelt her. Sie leiten Reize an die Nerven weiter, welche wiederum die Muskulatur kontrahieren und über die Gelenke dem Organismus Bewegung ermöglichen.

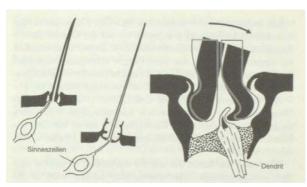
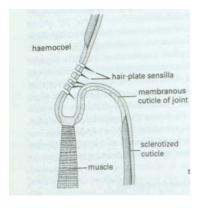


Abb. 34: Links: Zwei unterschiedliche Typen von Mechanosensillen, Rechts: Funktionsweise

Äusseres Sinnesorgan: Man hat den Eindruck, dass Arthropoden durch den dicken Panzer wenig spüren. Um Sinnenseindrücke wahrzunehmen, gibt es auf dem Körper Sinneshaare (Sensillen) (Abb. 31). Unter jedem Haar ist ein Dendrit (Abb. 34), welcher den Reiz aufnimmt und weiterleitet, sobald das Haar sich bewegt (Mechanosensille).



Oft sind die Sinneshaare an einen Muskel gekoppelt, um kontrollierte Bewegungsvorgänge durchzuführen. Durch die Bewegung der Sensillen wird der nebenanliegende Muskel in Bewegung gesetzt (Abb. 35).

Dehnbare Rezeptoren, welche die Länge der Muskeln erkennen und Sensoren, welche die Belastung sowie den Druck auf die Muskeln abmessen, liefern aktuelle Informationen zur Stellung.⁹¹

Der grobe Mechanismus der Sensorik ist erforscht, im Detail sind aber noch viele Fragen ungeklärt.

Abb. 35: Sensillen auf der Intersegmentalmembran

Inneres Sinnesorgan: Im Körperinnern haben die Arthropoden ein vernetztes Sinnesorgansystem. Zwischen zwei benachbarten festen Platten befindet sich ein spezielles Sinnesorgan, welches analog zu den Sensillen Bewegungsveränderungen wahrnimmt. Durch nach innen gerichtete Sinneshaare kontrolliert es laufend die Stellung der Sklerite und ergänzt damit die äussere Wahrnehmung der Mechanosensillen. Die Reize werden an die Muskulatur weiter geleitet. 92

Weitere Sinnesorgane: Es ist erstaunlich, mit welchen weiteren hochspezialisierten Sinnesorganen die Arthropoden ausgestattet sind. So nehmen sie über die Haare Duftstoffe wahr, orientieren sich mit komplexen Facettenaugen, können die Erdanziehungskraft, sowie die Druck- und Temparaturunterschiede auswerten.

Antennen sind ein wichtiges Sinnesorgan, welche zusätzliche Informationen liefern zu: Chemischen Reizen und Pheromonen, Wind- und Luftströmungen, Geschmack und Geruch, Feuchtigkeit, Gleichgewicht, sowie Schall.^{93,94,95}

⁹¹ The Insects – An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 84-85

⁹² Insekten – Die heimlichen Herrscher der Welt, K. Honomichl, S. 74

⁹³ Insekten – Die heimlichen Herrscher der Welt, K. Honomichl, S. 68-71

5.2 Bewegungsmechanismen der Arthropoden

Die gesamte Natur basiert auf Bewegungsabläufen. Ohne Bewegung kann nichts existieren. Es gibt unzählige Mechanismen, die der Bewegung dienen, welche grundsätzlich in aktive und passive eingeteilt werden. Die folgende Hierarchie der Bewegungsmechanismen der Arthropoden ist nicht vollständig, gibt jedoch eine Übersicht.

Bevor auf die Leitfrage relevanten Mechanismen (rot markiert im Diagramm 1) vertieft eingegangen wird, werden die anderen Fachbegriffe unten kurz erklärt.

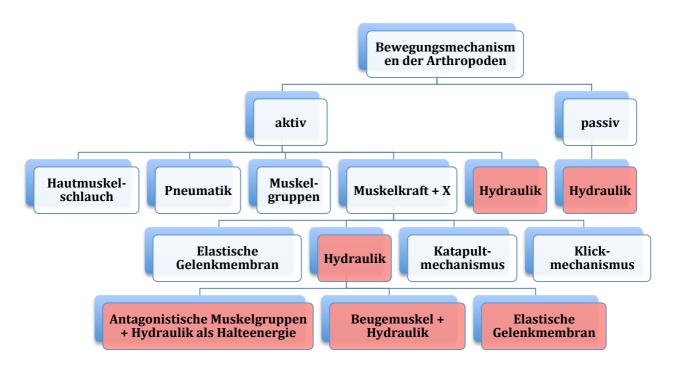


Diagramm 1: Nach Vorbild von Gundula Schieber erweitert und angepasst durch eigene Recherchen und Beobachtungen. Rot markierte Mechanismen betreffen die Fragestellung der Maturarbeit.

Erklärungen zu Diagramm 1:

Hautmuskelschlauch: Ohne festes Exoskelett, nur mit Muskeln bewegt, z.B. Bewegungen der Raupen, Maden, Larven

Pneumatik: Analog der Hydraulik, als Übermittlungsstoff wirkt Gas statt Flüssigkeit⁹⁶

Muskelgruppen: Beuger + Strecker, die meisten Gelenke werden so bewegt

Muskelkraft + X: Beuger durch Muskelkraft + Strecker durch Kraft-X

Elastische Gelenkmembran: Rückstellkraft der elastischen Gelenkmembran/Cuticula

Katapultmechanismus: Beugemuskel + Resilinpolster

⁹⁴ The Insects – An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 84-85

⁹⁵ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/H. Weidner, S. 118

⁹⁶ Pneu und Knochen IL 35 Universität Stuttgart, Otto Frei, S. 14-18, 20-28, 40-47, 50-66

Klickmechanismus: Beugemuskel + Einrastfunktion (Schnappgelenk)

5.2.1 Aktive Bewegungsmechanismen der Arthropoden

Aktive Bewegungen werden mittels Sensorik erkannt (s. *Sensorik 5.1.5*), über das zentrale Nervensystem gesteuert und teilweise von den Muskeln ausgeführt. Alle aktiven Bewegungen verbrauchen Energie, welche durch den Stoffwechsel erzeugt werden. Die grosse Vielfalt an aktiven Bewegungsmechanismen der Arthropoden zeugt von der jeweiligen Anpassung an die Umwelt. Aufgrund dieser Spezialisierung sind sie noch wenig erforscht, was eine vollständige Auflistung der aktiven Bewegungsmechanismen unmöglich macht.

5.2.2 Passive Bewegungsmechanismen der Arthropoden

Unter passiven Bewegungsmechanismen versteht man Bewegungen, welche ohne eigenen Energieaufwand ablaufen und durch Umwelteinflüsse wie Temperatur, Wind und Konzentrationsunterschiede (Osmose) beeinflusst werden. Auch hier gibt es eine Vielzahl von Mechanismen, welche bis auf die Hydraulik durch Osmose für diese Maturarbeit nicht relevant sind. Darum wurden für das Diagramm nur die aktiven Bewegungsmechanismen sowie die passive Hydraulik genauer recherchiert.

5.2.3 Hydraulik als Bewegungsmechanismus

In der Natur: In der Natur ist die Hydraulik weit vervbreitet, beinahe alle Lebewesen weisen hydraulisch funktionierende Systeme auf. Der Turgordruck bei Pflanzenblättern, weiche Organismen wie Schnecken und Würmer, Organe, Augen, Zellen, Adern und Blutgefässen oder Bakterien funktionieren alle mittels der Hydraulik. Die Hydraulik kann Tiere nur vergrössern, strecken oder dehnen. Andere Kräfte, wie Muskelkraft oder Spannungen, können das Individuum wieder in die natürliche Ausgangsposition zusammenziehen. Im folgenden Diagramm sind nur die für die Hydraulik relevanten Mechanismen erwähnt und rot markiert.

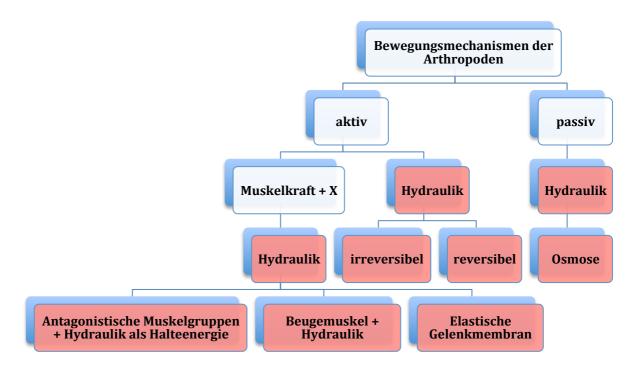


Diagramm 2: Hydraulische Bewegungsmechanismen der Arthropoden

Im folgenden Abschnitt werden alle gefundenen hydraulischen Systeme der Arthropoden näher beschrieben und mit Tierbeispielen bildlich dargestellt. Im praktischen Teil der Arbeit, *Kapitel 7 Resultate*, werden die untersuchten Arthropoden diesen Bewegungsmechanismen zugeordnet.

Irreversible Hydraulik: Wie im Kapitel *5.1.3 Aufbau des Exoskeletts, Verbundwerkstoffe* bereits beschrieben, müssen die Arthropoden sich häuten, um zu wachsen. Nach der Häutung pumpen sie ihren Körper mit Luft oder Wasser voll und warten bis sich die äusserste Schicht sklerotisiert hat. Dieser Vorgang ist irreversibel, da das Tier mit jeder Häutung wächst. Sehr gut zu sehen ist dies bei der Libelle (Abb. 36), da sie im Larvenstadium viel kleiner ist als nach der Häutung als fliegende Libelle. ^{97,98}

Die Schmetterlinge pumpen nach dem Schlüpfen ihre zerknitterten Flügel mit Blut voll bis diese die endgültige Grösse erreicht haben, dann erhärten die Flügel und sind für den Flug bereit (Abb. 37).⁹⁹





Abb. 36: Libelle nach der Häutung

Abb. 37: Schmetterling entfaltet Flügel

Reversible Hydraulik: Die reversiblen Bewegungen werden temporär durch hydraulischen Druck erzeugt und das Körpervolumen vergrössert sich beachtlich. Es gibt viele Gründe, warum die Tiere mehr Platz brauchen, um Nahrung zu speichern (Abb. 38, 39, 40) oder Eier zu lagern (Abb. 41). Die reversiblen hydraulischen Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie wieder in ihre Ursprungsform zurückkehren können.



Abb. 38: Mücke vollgesogen mit Blut

Abb. 39: Links: Zecke vollgesogen mit Blut, Rechts: Zecke in Normalgrösse

 $^{^{97}\,\}mathrm{http://www.libellenwissen.de/wissen/dokumentation/libellenschlupf-metamorphose}$

⁹⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Libellen

⁹⁹ http://www.actias.de/19826-schmetterlinge-züchten-in-der-schule.html

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015





Abb. 40: Arbeiterinnen der Honigtopfameise Abb. 41: Termitenkönigin mit Brut mit Nahrung





Antagonistische Muskelgruppen + Hydraulik als Halteenergie: Diesen Bewegungsmechanismus gibt es bei den Arthropoden, aber dieser ist noch wenig erforscht. Unter der hydraulischen Halteenergie versteht man, wenn die Hydraulik den Körper in einer bestimmten angespannten Form verharren lässt. Die Muskeln sind jedoch für die Beugung, sowie die Streckung zuständig, also für die gesamten Bewegungsabläufe. Ein Beispiel dafür ist die Raupe (Abb. 42), welche sich muskulär bewegt. iedoch durch Innendruck ihre Steifigkeit erhält. Vermutet wird, dass Würmer ebenfalls die Hydraulik als Halteenergie verwenden. 100

Abb. 42: Raupe in Bewegung



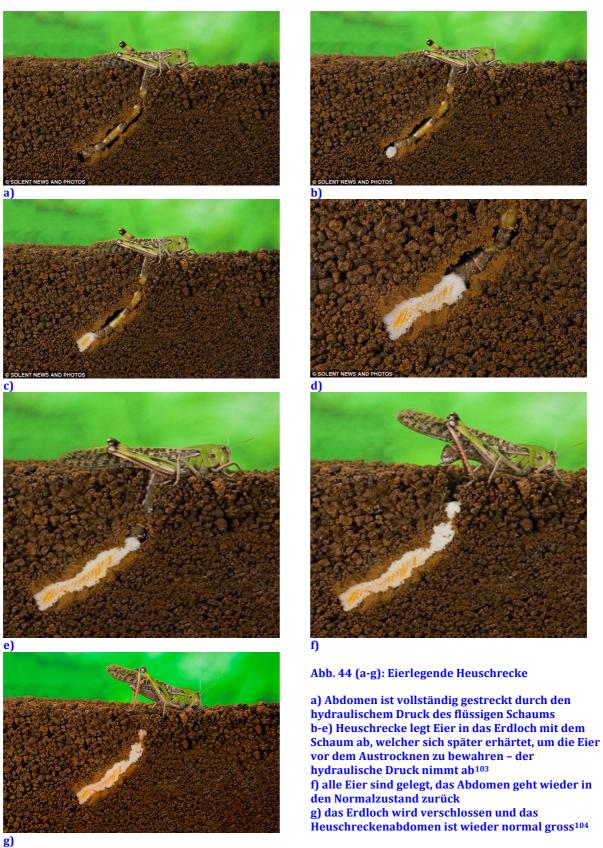
Abb. 43: Spinnenbeine gestreckt

Beugemuskel + Hydraulik: Da Muskeln Platz brauchen und schwer sind, gibt Arthropoden, welche die Hydraulik in ihren Gelenken verwenden, um Platz und Gewicht zu sparen. Dabei wird der Streckmuskel durch Hydraulik ersetzt. Gut zu sehen und später experimentell untersucht, ist das hydraulische System der Spinnenbeine (Abb. 43).101 Auch die Heuschrecken besitzen einen hydraulischen Strecker, wie in der Bilderreihe (Abb. 44) wunderbar ersichtlich ist. 102

¹⁰⁰ http://de.wikipedia.org/wiki/Raupe_(Schmetterling)

¹⁰¹ http://www.uni-jena.de/-p-287633.html

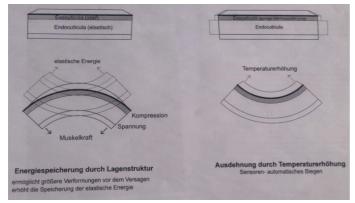
¹⁰² Biology of the Arthropod Cuticle, Anthony Neville, S. 364-365



¹⁰³ http://netportal.de/tiere/die-zucht-von-wanderheuschrecken/

¹⁰⁴ http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2743522/Spectacular-images-reveal-locust-s-reproductive-organ-grows-TWICE-body-length-lay-100-eggs-deep-soil.html

Elastische Gelenkmembran: Wie bereits mehrfach erwähnt ist die Membran der Arthropoden extrem elastisch und flexibel. Einzelne Teile des Exoskeletts sind zusätzlich leicht verformbar. Dieses Potential wird teilweise ausgenutzt, um die Rückstellkraft der elastischen Gelenkmembran und der Cuticula zu nutzen. Elastische Membrane können durch beliebige Mechanismen gedehnt werden, interessant für diese Arbeit ist nur die durch Hydraulik gedehnte. Gliederfüssler, welche die reversible Hydraulik verwenden, nutzen auch die elastische Rückstellkraft. Voraussetzungen dafür sind: Proteine wie



Resilin o.a., niedriger Sklerotisierungsanteil, jedoch ein hoher Wassergehalt und eine geeignete Strukturierung der Chitinfasern. Die Cuticula kann ebenfalls durch ihren Schichtverbund Energie freisetzten, wie auf der Abbildung 45 zu sehen ist.

Abb. 45: Potential des Schichtverbunds nach Gundula Schieber

Passive Hydraulik, die Osmose: Der einzige hydraulische Bewegungsmechanismus, welcher passiv abläuft, ist die Osmose. Auch hier ist noch wenig erforscht. Doch wird vermutet, dass die Cuticula je nach Sklerotisierungsgrad Wasser osmotisch aufnehmen kann, um sich so zu dehnen. Die Cuticula wird auch weicher, je höher ihr Wasseranteil ist. Das einzig gefundene Beispiel mit osmotischer Hydraulik ist die Garnele, welche im praktischen Teil noch genauer untersucht wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Damit Arthropoden leicht gebaut sind, müssen ihre Gelenke und Bewegungsmechanismen auf ein Minimum an Gewicht und Material reduziert werden. Hydraulische Gelenke ermöglichen sowohl eine hohe Beweglichkeit als auch eine maximale Gewichtsreduktion.

»Diese Beobachtungen, so meinen die Forscher, könnten Ingenieuren als Ausgangspunkt für die Entwicklung künstlicher, hydraulischer Systeme bieten: "Die Natur hat bereits viele solcher Systeme exquisit angewendet. Wir müssen sie nur nachahmen." So *Jan M. Skotheim* von der University of Cambridge und sein Kollege *Lakshminarayanan Mahadevan* der Harvard University.«¹⁰⁵

Im praktischen Teil, *Kapitel 7 Resultate*, werden diese Bewegungsmechanismen anhand einiger Arthropodenbeispiele genauer untersucht. Dargestellt werden die Ergebnisse wie folgt: Allgemeine Informationen, Funktion, Aktuatorik, Sensorik, Bewegungsfreiheit und -intervalle und deren Zusammenhang.

-

 $^{^{105}\,}http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/gruene-hydraulik-forscher-entwickeln-bewegungslehre-fuer-pflanzen-a-357985.html$

In der Technik: Die Hydraulik (griech. 'hydor' Wasser, 'aulos' Rohr) beschäftigt sich in der Technik mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten. Im Jahre 1795 entwickelte Joseph Bramah die erste hydromechanische Maschine, welche durch Druckwasser angetrieben wurde. Er nutzte das hydrostatische Gesetz von Blaise Pascal, welches die eingesetzte Kraft um das 2034-fache verstärkt.

Das Prinzip der Hydraulik ist sehr simpel (Abb. 46). Wird der Pumpkolben (2) nach unten gedrückt, schliesst das Ventil 1 (4) und das Ventil 2 (5) öffnet, die Flüssigkeit (Hydrauliköl) strömt in den Presszylinder. Der Presskolben (3) hebt sich. Mit einer kleinen Kraft F_1 auf einen Kolben mit einer kleinen Querschnittsfläche A_1 , wird eine grosse Kraft F_2 an einem Kolben mit grosser Querschnittsfläche A_2 hervorgerufen. 106

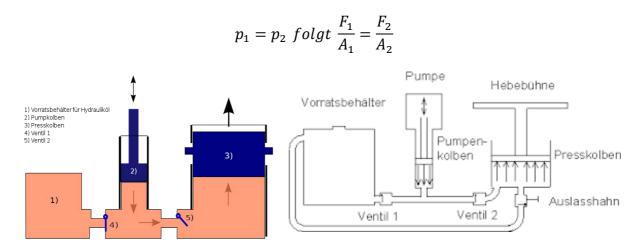


Abb. 46: Hydraulische Presse

Abb. 47: Hydraulische Hebebühne

Am Beispiel der Hebebühne (Abb. 47) wird ersichtlich wie eine Leistung-, Energie- oder Kraftübertragung im Alltag genutzt werden kann.

Dieses einfache Prinzip der Krafvergrösserung ist für vielfälltige Anwendungen in der Technik geeignet. Es kommen verschiedene Flüssigkeiten zum Einsatz, wobei sich Wasser als ein billiges, ungefährliches, stabiles und effizientes Material besonders eignet.

_

¹⁰⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulik

5.2.4 Bewegliche Systeme

Hydraulik setzt voraus, dass Beweglichkeit vorhanden ist. Bewegliche Systeme, technisch Verbindungstechnik genannt, beschreiben die Methode des Zusammensetzens von Einzelteilen zu einer funktionierenden Einheit. Grundsätzlich werden sie in untrennbare und trennbare eingeteilt. In der Regel handelt es sich bei Tieren um untrennbare Verbindungen. Verbindungen, die nur die Beweglichkeit zwischen zwei Teilen ermöglichen, sind Gelenke.

Die beweglichen Systeme der Arthropoden werden in einer Hierarchie dargetellt. Da alle Arthropoden nur untrennbare Gelenke besitzen, wurden nur diese weiter recherchiert. Die folgende Hierarchie der Arthropoden ist nicht vollständig, gibt jedoch eine Übersicht. Die für die Hydraulik relevanten Mechanismen sind rot markiert.

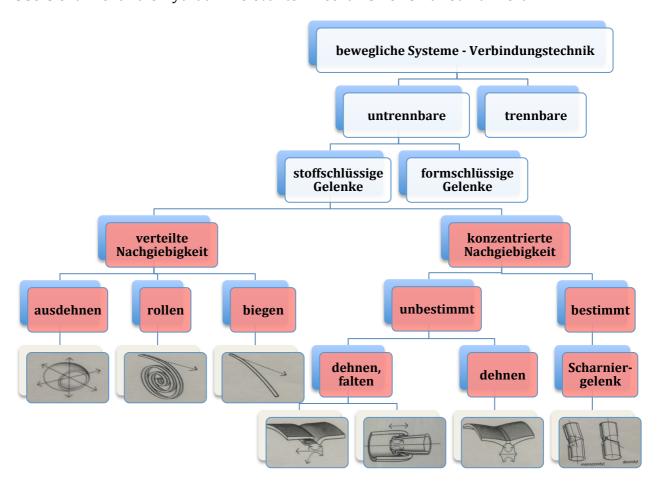


Diagramm 3: Nach Vorbild von Gundula Schieber erweitert und angepasst durch eigene Recherchen und Beobachtungen. Rot markierte bewegliche Systeme betreffen die Fragestellung der Maturarbeit, Grafiken unterster Zeile nach 'Grundriss der Insektenkunde', H. Weber und H. Weidner.

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015

Erklärungen zu Diagramm 3: 107

Stoffschlüssige Gelenke: die Verbindungspartner werden durch atomare oder molekulare Kräfte zusammengehalten

Formschlüssige Gelenke: mindestens zwei ineinandergreifende Verbindungspartner, z.B. Verfalzungs- und Sperrmechanismen bei Widerhacken der Arthropoden an den Deckflügeln oder Beinen¹⁰⁸

Verteilte Nachgiebigkeit: die Kraft wird auf das ganze nachgiebige Volumen verteilt

Konzentrierte Nachgiebigkeit: die Kraft wird nur auf einen Teil des nachgiebigen Volumens verteilt

Im praktischen Teil der Arbeit, Kapitel 7 Resultate, werden die untersuchten Arthropoden diesen beweglichen Systemen zugeordnet.

¹⁰⁷ http://de.wikipedia.org/wiki/Verbindungstechnik

¹⁰⁸ http://www.uni-

saarland.de/fak8/bi13wn/projekte/biomechanik/projects/dillinger.htm

6 Material und Methoden

Grundsätzlich gibt es in der Bionik folgende zwei Vorgehensweisen: Entweder gibt es eine Idee des Endproduktes und es werden passende Vorbilder in der Natur gesucht, oder es wird ein interessanter Mechanismus in der Natur entdeckt, welcher untersucht und zu einem marktfähigen Produkt weiterentwickelt wird.

Für diese Arbeit wurde die zweite Arbeitsweise verwendet, indem ein Vorbild aus der Natur ausgewählt und genauer untersucht wurde, um mögliche technische Anwendungen zu skizzieren. Dies entspricht den Schritten 1. Untersuchen, 2. Abstrahieren und 3. Umsetzten.

- 1. Untersuchen der wesentlichen Strukturen und ihrer Funktionen in der Natur
- 2. Abstrahieren der wesentlichen Merkmale aus Punkt 1 nach Gesetzen der Natur
- 3. Umsetzten der allgemeinen Prinzipien aus Punkt 2 nach den Gesetzen des Markts

6.1 Untersuchungsmaterial

Im Folgenden werden diejenigen Arthropodenarten genannt, welche als Vorbilder in dieser Maturarbeit untersucht wurden.

- Europäische Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*), weibliches Individuum aus der Eigenzucht für Tierfutter des Zoologischen Gartens Basel
- Wüstenheuschrecke (*Schistocerca gregaria*), weibliches Individuum aus der Zoohandlung Qualipet Basel, die sie für Tierfutter züchten
- Nordseegarnele (*Crangon crangon*), aus Elmas Fischhandel Stuttgart, Fang der Nordsee
- Heimchen (*Acheta domesticus*), aus Tierhandlung in Stuttgart, geeignet als Tierfutter
- Erdfinsterspinne (*Coelotes terrestris*), aus dem feuchtem Laubwald westlich von Botnang (Stuttgart), gefunden in einer Erdhöhle unter einer Laubschicht
- Gerandeter Saftkugler (*Glomeris marginata*) aus Uferzone des Rheins bei Ilanz, gefunden im Totholz und Laub.

6.2 Vorbereitung

Der erste Schritt der Maturarbeit bestand in der Erstellung eines Arbeitsplanes.

Was wurde gemacht?	Wie wurde es gemacht?
• Suche nach Ideen & Vorbildern in der Natur (hier nur Arthropoden), Analyse und Grundlagenforschung Was ist interessant? Was ist machbar? Was gibt es bereits, was noch nicht?	Recherchieren Internet, Google Scholar, Bücher, Lexika und Wissenschafts- magazine im Bereich Biologie & Entomologie
Ein Mechanismus/ Prinzip wurde gefunden, Beurteilung & Auswahl	•In Betreuung durch Gundula Schieber
• Analogienforschung Form- und Funktionsvergleich bei Arthropoden. Welche weiteren Arthropoden besitzen diesen Mechanismus? Gibt es verwandte Mechanismen? Wie wird das Problem bei anderen Arthropoden gelöst?	Recherchieren Internet, Google Scholar, Bücher, Lexika und Wissenschafts- magazine im Bereich Biologie & Entomologie
• Wie funktioniert der Mechanismus? Was ist wesentlich? (s. Kapitel 7, Resultate)	 Fachspezifische Recherchen im Internet, Google Scholar, Bücher, Lexika und Wissenschaftsmagazine im Bereich Biologie, Entomologie, Bionik Untersuchen mit wissenschaftlichen Geräten (diverse Mikroskope)
• Ideenfindung zur technischen Umsetzung (nicht kopieren!) Wie kann der Mechanismus in ein marktfähiges Produkt umgesetzt werden? Welche Materialien werden gebraucht? Was ist finanziell, materiell und umstandsbedingt möglich? (hier endet mein Experiment)	Fachspezifische Recherchen im Internet, Google Scholar, Bücher, Lexika und Wissenschaftsmagazine im Bereich Technik, Architektur, Bionik
• Umsetzung der Idee: Bau und Konstruktion eines Prototyps mit gewähltem Mechanismus	Werkstatt, Labor mit diversen Mitteln und Utensilien
Optimierung des Prototypen	Test und Versuche inkl. Auswertung der Daten und Schlussfolgerung
• Endprodukt: Anwendung, Vermarktung und Evaluation bei den Anwendern	• Vorstellen, vermarkten und evaluieren des Endproduktes

Vorbereitende Recherchen zu Arthropoden, welche ein hydraulisches System besitzen und somit für diese Maturarbeit relevant sind, wurden folgendermassen gemacht: Computer mit Zugang zu Internet und Google Scholar (für wissenschaftliche Berichte und Papers), über die Bibliothek der Universität Stuttgart und Basel mit Zugang zu wissenschaftlicher Literatur in den Bereichen Biologie, Entomologie, Technik, Bionik und Architektur. Des weitern waren diverse Gespräche am Anfang der Maturarbeit mit Frau Gundula Schieber sehr hilfreich.

Für den praktischen Teil der Arbeit wurde versucht, möglichst viele verschiedene Arthropoden mit hydraulischen Systemen zu erwerben. Dies stellte sich als schwierige Herausforderung dar. Nach vielen Versuchen und Recherchen konnten die unter 6.1 Untersuchungsmaterial aufgelisteten Tiere gekauft oder gefunden werden. Leider waren keine Ameisen- oder Termitenköniginnen erhältlich, da diese normalerweise nicht käuflich sind. Auch Honigtopfameisen sind sehr selten und sehr teuer und ob ihr Abdomen wirklich extrem dehnbar ist konnte vom Verkäufer nicht herausgefunden werden. Zecken wurden im Stuttgarter Wald gefunden, doch war es unmöglich ihre Abdomenhaut zu dehnen. Vom gerandeten Saftkugler wurden Makrofotografien und Lichtmikroskop-Aufnahmen gemacht, doch alle Saftkugler zerfielen in ihre einzelnen Segmente, da diese sehr locker aneinander hängen. Deshalb konnten keine weiteren Untersuchungen mit den Saftkuglern gemacht werden.

Mit der Erdfinsterspinne wurde zuerst eine Lauf- und Bewegungsanalyse gemacht, um zu sehen wie sich das Tier im Detail fortbewegt. Speziell wurden die hydraulischen Beingelenke betrachtet, was sich als schwierig erwies, da die Spinnenbeine sich enorm schnell bewegen und das Festhalten der Stellungen beinahe unmöglich war. Die Fotografien der Erdfinsterspinne (Abb. 72) wurden mit lebenden Tieren gemacht, da die Spinne nach dem Tod die Beine anzieht.

Im Zoo Stuttgart wurden Fortbewegungsanalysen zu den Garnelen gemacht. Mit dieser Studie sollte herausgefunden werden, wo das hydraulische System der Garnelen ist und was es genau bewirkt. Wie später beschrieben wird, waren weder die Schwimm- noch die Laufanalysen aussagekräftig, um die Hydraulik zu orten.

Das Heimchen wurde in der mit Gras gefüllten Box beobachtet. Die Bewegungen mit den Fühlern waren interessant. Es ging darum, wie die Grille die Fühler je nach Berührung oder Luftströmung bewegt. Die beiden Antennen reagierten sehr schnell und unabhängig voneinander.

Im Zoo Basel wurde versucht, eine eierlegende Wanderheuschrecken zu beobachten, um ihr dehnbares Abdomen zu sehen. Leider ohne Erfolg, denn keine der Heuschrecken legte Eier, so musste auf Bildmaterial aus dem Internet zurückgegriffen werden.

Die Wander- und Wüstenheuschrecken wurden je nach Untersuchungsmethode unterschiedlich präpariert. Für die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen mussten die Tiere tot und trocken sein, was ziemlich aufwändig war. Die Atomic Force Microscop-Aufnahmen wurden mit frischen Tieren gemacht, um die Struktur des Abdomens möglichst nicht zu verändern. Dazu wurden sie kurz vorher im Alkohol getötet.



Nach den Erstuntersuchungen wurden die Untersuchungstiere zuerst im Tiefkühler heruntergekühlt bis sie sich nicht mehr bewegten und dann in 70 %-igem Ethanol eingelegt, um sie zu töten und zu konservieren (Abb. 48).

Abb. 48: Heimchen und Wüstenheuschrecke in 70 %-igem Ethanol

Ebenfalls auf Bildmaterial aus dem Internet musste bei den Libellen zurückgegriffen werden. In einem kleinen, namenlosen Weiher am Waldrand von Stuttgart wurde früh morgens mehrmals versucht, das Schlüpfen einer Libellenlarve zu beobachten. Auch hier kein Erfolg. Die leeren Hüllen der Libellen, Exuvie genannt, wurden oft gefunden. Laut Internet und Literaturrecherchen ist die Morgendämmerung ideal, um Libellen beim Schlüpfen zu sehen (eine Auswahl der Quellen folgt). 109,110,111

Auch vom Schlüpfen der Fliegen konnten keine eigenen Bilder gemacht werden. Die Zucht von Fliegen ist aufwändig und die Erfolgschancen sind mässig. Da sehr viel gutes Bildmaterial im Internet vorhanden ist, konnte das hydraulische System der Fliegen mit diesem gut erklärt werden.

39

 $^{^{\}rm 109}$ http://www.libellenwissen.de/wissen/dokumentation/libellenschlupf-metamorphose

¹¹⁰ http://www.bilder-der-natur.de/show.shtml

¹¹¹ http://www.waldzeit.ch/nachhaltigkeit/oekologie/insekten/libellen/libellen-elegante-flugkunstler-gefrassige-rauber/

6.3 Makrofotografie

Die Makrofotografie wurde mit einer Canon EOS 50D mit einem Makro-Objektiv (EF 100mm f/2.8 Macro USM, Canon) der Universität Stuttgart aufgenommen. Um eine qualitativ gute Aufnahme mit besserer Ausleuchtung zu erhalten, wurde ein Ringblitz (Mecablitz 15 MS-1 digital, Metz) verwendet. Die Bilder wurden mit Photoshop CS6 bearbeitet. Es wurde der Kontrast, sowie die Helligkeit einiger Aufnahmen minim verändert, um ein deutlicheres Resultat zu erhalten. Die Arthropodenexemplare waren teilweise lebendig, andere waren tot und wurden zuvor in 70 %-igem Ethanol eingelegt.



Abb. 49: Makrofotografie

6.4 Mikroskopie

Die Mikroskop-Aufnahmen wurden mit einem Bresser LCD-Monitor 8.9 cm Mikroskop mit 4-fach und 10-fach Vergrösserungslinsen der Universität Stuttgart aufgenommen. Die Bilder wurden mit Photoshop CS6 bearbeitet. Es wurde der Kontrast, sowie die Helligkeit einiger Aufnahmen minim verändert, um ein deutlicheres Resultat zu erhalten. Die Arthropodenexemplare waren tot und zuvor in 70 %-igem Ethanol eingelegt.



Abb. 50: Mikroskop Bresser

6.5 Lichtmikroskopie

Die Lichtmikroskop-Aufnahmen wurden mit der Leica MZ16 (Auflicht) mit Fotoeinheit an der Universität Basel aufgenommen. Das Lichtmikroskop steht im Pharmazentrum (PZ U1002). Die Abdomen der Wander- und Wüstenheuschrecken wurden zuvor in 70 %-igem Ethanol konserviert.



Abb. 51: Lichtmikroskop

6.6 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die REM-Aufnahmen wurden mit dem REM - FEI Nova Nano SEM 230 der Universität Basel aufgenommen. Eva Bieler¹¹² betreute die Arbeiten. Das REM befindet sich im Pharmazentrum (PZ U1002). Das REM erzeugt Oberflächenabbildungen mit sehr grossen Vergrösserungen.



Abb. 52: REM der Universität Basel

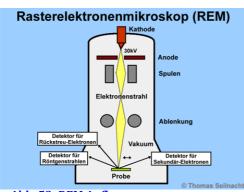


Abb. 53: REM Aufbau

Aufbau: Am oberen Ende des Mikroskops wird ein Wolframdraht zum Glühen gebracht, dadurch werden Elektronen frei (Kathode), welche durch ein starkes elektromagnetisches Feld (Anode) beschleunigt werden. Durch mehrere Linsen wird der Elektronenstrahl auf einen Durchmesser von ca. 1 nm beschränkt. Die Probe befindet sich direkt unter dem Elektronenstrahl, welcher die Oberfläche abtastet. Wenn der Elektronenstrahl auf die Probenoberfläche auftritt, werden

verschiedene Strahlungen und Elektronen frei. Diese werden schlussendlich von jedem Punkt der Probe ausgewertet und so entsteht das schwarz-weisse Bild.¹¹³

Sputter: Um die Abdomen im REM zu untersuchen, mussten diese zuerst gesputtert werden, das heisst mit einer hier 40 µm dünnen Schicht Gold überzogen werden. Dafür wurde das Leica EM ACE600 - Double Sputter Coater mit Motortisch/ Planetentisch - Kühlfalle ohne VCT-Dock (Meissner Trap) - der Universität Basel unter der Anleitung von Evi Bieler verwendet. Der Sputter, oder Kathodenzerstäuber, beschichtet das gewünschte Objekt im Vakuum mit einer dünnen Schicht Gold.

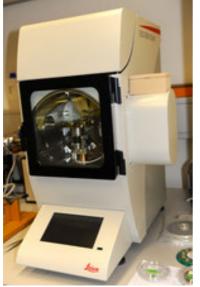


Abb. 54: Sputter der Universität Basel

¹¹² https://zmb.unibas.ch/mitarbeitende/

¹¹³ https://zmb.unibas.ch/remtemlm/wissenswertes-ueber-das-raster-elektronenmikroskop/

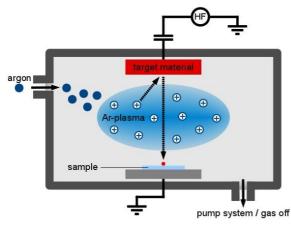


Abb. 55: Sputter Aufbau

Aufbau: Zwei Metallplatten werden einer Hochspannung (ca. 1500 Volt) ausgesetzt. Das Argongas ionisiert und es entstehen positive Argon-Ionen, welche von den negativen Goldplatten (target material) beschleunigt werden, dadurch werden Goldpartikel frei. Durch Kollisionen mit den Argon-Ionen wird das Gold diffus über das Sample gestreut. So entsteht die leitfähige Schicht auf der Probe. Ohne diese können organische Proben unter dem REM nicht betrachtet werden.







Abb. 57: Proben nach dem Sputtern

Vorbereitung der Proben: Die Heuschreckenabdomen müssten vollständig getrocknet werden, da sie sonst im Sputter bei der Vakuum-Erzeugung explodieren. Im ersten Versuch wurden die Heuschrecken vier Tage in 70 %-igem Ethanol entwässert und danach während einer Stunde unter einer Lampe getrocknet. Beim Sputtern sind die Proben dann kaputt gegangen, da sie noch zu viel Wasser enthielten. Bei einem weiteren Versuch wurden die Heuschreckenabdomen während drei Tagen in Ethanol dehydriert, anschliessend zwei Tage auf einer Zimmerheizung bei ca. 22° C luftgetrocknet, weiter zwei Tage im Heizkasten des Gymnasiums bei 40° C und schlussendlich während fünf Stunden bei 60° C getrocknet. Die Tiere fühlten sich sehr ausgetrocknet an. Doch beim Sputtern sind sie wieder explodiert. Andere Verfahren als die Lufttrocknung kommen kaum in Frage, da die Membran der Tiere äusserst empfindlich ist. Wichtig ist, dass sie nicht bei einer zu hohen Temperatur getrocknet werden, da sonst die Membran kaputt gehen kann.







Abb. 59: nicht sauber gesputterte Probe



Abb. 60: nicht sauber gesputterte Probe

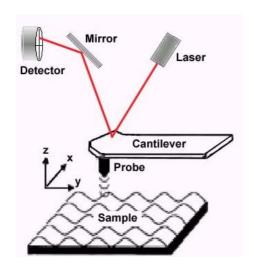
In der Abb. 58 ist das gesputterte ungedehnte Abdomen einer Heuschrecke zu sehen. Der Goldbelag ist regelmässig verteilt und es gibt keine farblichen Veränderungen, also eine ideale Probe für das REM. In den Abb. 59 und 60 sind gesputterte gedehnte Heuschreckenabdomen zu sehen, doch ist das Gold nicht regelmässig verteilt und es gibt viele Flecken. Diese sind später in den REM-Bildern als schwarze Flecken zu erkennen, welche jegliche Strukturen verdecken. Vor allem die Intersegmentalmembran wurde stark verfleckt, dies wohl, da sie verletzt wurde und danach Flüssigkeit ausgetreten ist. Erstaunlicherweise ist das Abdomen in Abb. 58 aus dem ersten Durchgang, bei welchem die Abdomen nur kurz unter einer Lampe trocknet wurden, gut gelungen. Die Proben vom zweiten Durchgang in Abb. 59 und 60 wurden lange dehydriert, wie bei der Vorbereitung beschrieben. Jedoch sind die gedehnten Versuchsabdomen aus dem ersten Durchgang ebenfalls geplatzt. Folglich wurden beim Dehnen die Membranen verletzt, was ein gutes Sputtern verunmöglichte. Für weitere Versuche wird empfohlen, die Abdomen vor dem Trocknen vom Körper zu trennen und diese viel länger zu trocknen als beschrieben, da sie im Innern noch Flüssigkeit beinhalteten. Wie die Dehnung vollzogen werden kann, ist weiter unklar, da keiner der sechs Versuche geglückt ist, trotz sorgfältiger Arbeit.



Abb. 61: AFM der Universität Basel

6.7 Atomic Force Microscope (AFM)

Die AFM-Aufnahmen wurden mit dem AFM JPK Nanowizard I und einem Cantilever DNP-S10 D von Bruker mit der Steifheit von 61 mN/m an der Universität Basel aufgenommen. PhD Philipp Oertle ¹¹⁴ betreute die Arbeiten. Das AFM, auch atomares Kraftmikroskop genannt, befindet sich im dritten Stock des Biozentrums (Raum 339).



Aufbau: Das AFM tastet die Oberfläche mechanisch ab und misst die atomaren Kräfte. Auf dem Cantilever befindet sich eine kleine Nadel, welche das Sample abrastert (scan). Der Laserstrahl, welcher auf die reflektierende Oberfläche des Cantilever trifft, wird zum Detector weitergeleitet. Durch die Struktur des Samples wird der Laserstrahl mehr oder weniger ausgelenkt, so wird die Oberflächenstruktur oder die Steifheit am Computer sichtbar.

Abb. 62: AFM Aufbau

Kraft-Abstands-Kurven: Der Cantilever wird mehrmals mit einer bestimmten Kraft auf die Probe gedrückt und danach wieder entfernt. Dabei werden die auf die Nadelspitze wirkenden Kräfte in Abhängigkeit der Spitzenposition aufgezeichnet. Aus den entstandenen Kurven lassen sich Rückschlüsse auf verschiedene Eigenschaften der Probe gewinnen, wie z.B. die Steifigkeit oder die Elastizität.

Vorbereitung der Proben: Die Heuschreckenabdomen mussten frisch und unbehandelt sein. Die Tiere wurden zuerst in die Tiefkühltruhe bei – 20 ° C gelegt und dann kurz im Alkohol getötet. Das Abdomen wurde in einzelne Segmente zerschnitten und gesäubert. Das fertige Sample bestand nur aus dem Exoskelett und wurde mit Araldit in einer Schale befestigt.

44

¹¹⁴ http://www.biozentrum.unibas.ch/de/forschung/gruppen-plattformen/group/unit/lim/

7 Resultate

In diesem Kapitel werden anhand von fünf selbst untersuchten Arthropodenarten die unterschiedlichen Hydraulikmechanismen im Detail erläutert. Die einzelnen Vorbilder werden immer anhand des gleichen Schemas vorgestellt:

- Allgemeine Information
- **Funktion** (Eiablage, Nahrungsspeicher, Bewegung, Einrollen, u.w.)
- **Aktuatorik** (Muskulatur, Hydraulik)
- Sensorik
- Bewegungsfreiheit und -intervalle
- Zusammenhang: Form Funktion Aktuatorik Sensorik

Um die Lesbarkeit und damit die Verständlichkeit zu vereinfachen, werden im letzten Absatz "Zusammenhang: Form – Funktion – Aktuatorik – Sensorik" die vorgestellten Resultate in einen logischen Zusammenhang gestellt und kurz zusammenfassend erläutert.

7.1 Europäische Wanderheuschrecke und Wüstenheuschrecke (weiblich)







Abb. 64: Europäische Wanderheuschrecke, oben: normal, unten: gestreckt



Abb. 63: Wüstenheuschrecke, oben: normal, unten: gestreckt

Allgemeine Information: Die weiblichen europäischen Wanderheuschrecken (Locusta migratoria) werden bis zu 55 mm gross und haben ein extrem dehnbares Abdomen (Abb. 64).¹¹⁵

Die Wüstenheuschrecken *(Schistocerca gregaria)* (Abb. 63) bilden riesige Schwärme, bestehend aus bis zu 2 Milliarden Tieren! Sie sind eine grosse Plage für die Landwirte, sie fressen innert Stunden ganze Felder kahl. Auch die weiblichen Wüstenheuschrecken besitzen ein dehnbares Abdomen, wie oben rechts im Vergleich zu sehen ist.¹¹⁶



Weibliche Heuschrecken tragen die sich entwickelnden Eier in ihrem Abdomen und legen diese tief in den feuchten und kühlen Boden, wozu sie ihr Hinterteil in die Erde graben. Dafür muss das Abdomen einerseits um ein Vielfaches verlängert werden, andererseits muss es eine gewisse Steife haben.^{117,118,119}

Funktion: *Eiablage und Bewegung:*

Abb. 65: Wanderheuschrecke legt Eier

¹¹⁵ http://de.wikipedia.org/wiki/Europäische_Wanderheuschrecke

¹¹⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Wüstenheuschrecke

¹¹⁷ https://www.youtube.com/watch?v=taJRllwe6nk

¹¹⁸ https://www.youtube.com/watch?v=5lgqRYJ_bgo

¹¹⁹ Biology of the Arthropod Cuticle, A.C. Neville, S. 17

Aktuatorik: reversible Hydraulik und Muskulatur: Die Intersegmentalmembran der weiblichen Heuschrecken hat einen hohen Wasseranteil, dies erklärt die enorme Elastizität. Weiter sind die Chitinfasern so angelegt, dass eine Streckung um bis zu 12 cm möglich wird. Die Zusammensetzung und der Grad der Sklerotisierung sind ebenfalls sehr wichtige Faktoren.^{120,121}

Gestreckt wird das Abdomen durch hydraulische Kräfte. Die Eier und ein schaumartiges Sekret füllen das Abdomen und lassen es grösser und steifer werden. Wie stark die Muskulatur an der Streckung beteiligt ist, konnte nicht herausgefunden





werden. Jedoch ist die Muskulatur für die Instandstellung des Normalzustandes wichtig. Im Abdomen der Heuschrecken gibt es Längsmuskeln, welche das Abdomen in der Länge zusammenziehen, sowie Quermuskeln, welche die Sklerite quer zusammenziehen. 122

Als Übersicht zeigen die drei Abbildungen in Abb. 66 das Heuschreckenabdomen und ihre Sklerite seitlich und von unten. Gut ersichtlich ist der verschachtelte Aufbau der Sklerite: Das nächst kleinere Segment liegt passend im nächst grösseren.

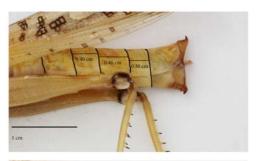
Abb. 66: Europäische Wanderheuschrecke

Die Abbildungen 66 a und b zeigen die Abdomen oben im Normalzustand und unten im ausgestreckten Zusatand.





Abb. 66a: Europäische Wanderheuschrecke



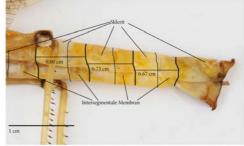


Abb. 66b: Wüstenheuschrecke

¹²⁰ Solid Biomechanics, R. Ennos, S. 75-79

¹²¹ Biology of the Arthropod Cuticle, A.C. Neville, S. 364-366

¹²² http://de.wikipedia.org/wiki/Oothek

In den Abbildungen 67 a), c) ist das Abdomen der Wüstenheuschrecke (Schistocerca gregaria) im Normalzustand dargestellt, also wenn das Weibchen gerade keine Eier legt. Gut zu sehen ist, dass die Sklerite sich überlappen und so die Intersegmentalmembranen (ISM) verdecken. In den Abbildungen 67 b), d) ist das Abdomen künstlich gedehnt worden. Sichtbar wird die weisse, milchige Membran. In der Natur ist diese in ihrem natürlichen Zyklus noch mehr dehnbar. Doch sind die untersuchten Heuschrecken nicht trächtig, da sie unbefruchtet sind und keine Eier in sich haben.

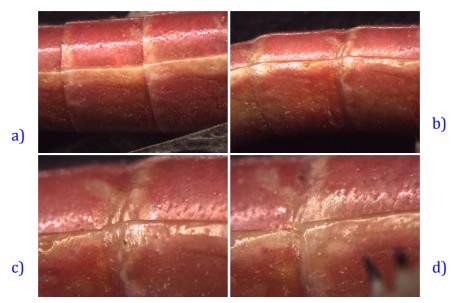


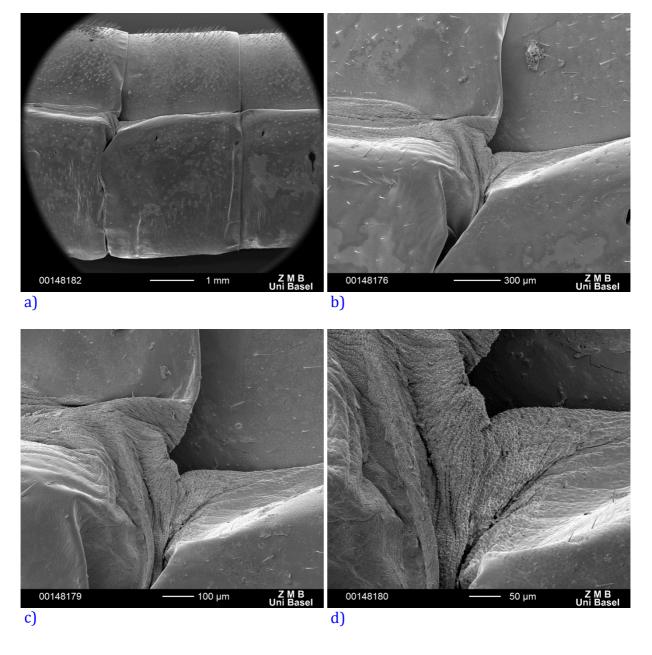
Abb. 67: Lichtmikroskop-Aufnahmen des Abdomens der Wüstenheuschrecke: (Bildausschnitt 8.3 mm) a) Normalzustand, b) gestreckt; (Bildausschnitt 4 mm) c) Normalzustand, d) gestreckt

Analog ist in den Abbildungen 68 a), c) das Abdomen der europäischen Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*) im Normalzustand zu sehen und in den Abbildungen 68 b), d) wurde es künstlich gedehnt. Wieder ist die elastische Membran, welche braun glatt strukturiert ist, zu sehen.



Abb. 68: Lichtmikroskop-Aufnahmen des Abdomens der europäischen Wanderheuschrecke: a) Normalzustand (Bildausschnitt 8.3 mm), b) gestreckt (Bildausschnitt 6 mm), c) Normalzustand (Bildausschnitt 4 mm), d) gestreckt (Bildausschnitt 4 mm)

Ohne die Beweglichkeit der Sklerite durch die Membranen könnten weder die Muskeln noch die Hydraulik das Tier bewegen. Darum wurde im nächsten Abschnitt das Abdomen der Heuschrecke mit dem REM (FEI Nova Nano SEM 230) der Uni Basel untersucht. In der folgenden Bilderreihe wird ein Übergang von zwei dorsalen (Tergit) und zwei bauchseitigen Platten (Sternit) gezeigt. Da das Abdomen in voraus leicht gebogen wurde ist die Pleuritmembran zu sehen. In der Abbildung 69 a) ist rechts im Bild ein vollständig überlappender Übergang von vier Skleriten zu sehen. Je höher die Vergrösserung, desto besser wird die papillenartige Struktur der Pleuritmembran ersichtlich. Sie ist stark gefaltet und ihre Oberfläche ist noppig. Die Membran weist durchschnittlich 10-15 Erhöhungen pro $10~\mu m^2$. Beides weist auf eine grosse Elastizität hin. Wird die Membran vollständig gedehnt, glättet sich zuerst die Faltung und danach ebnet sich auch die Noppenstruktur. Gut zu sehen ist die unterschiedliche Oberflächenstruktur der Membran und der Sklerite. Alle Membranstrukturen am Abdomen der Wanderheuschrecke sind analog aufgebaut. Unter dem Bild ist jeweils die Referenzlänge angegeben.



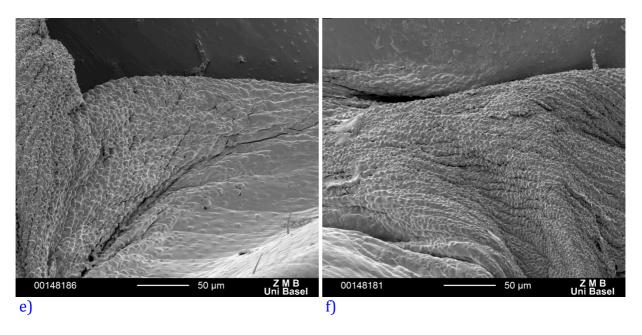
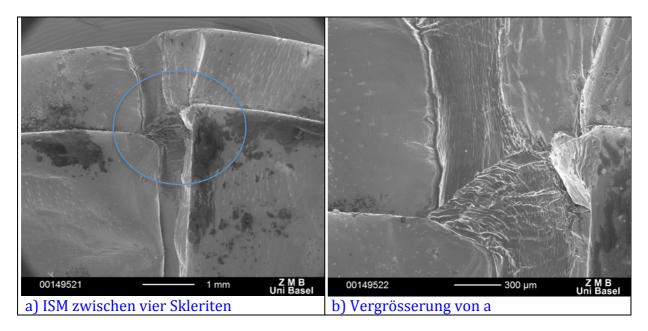
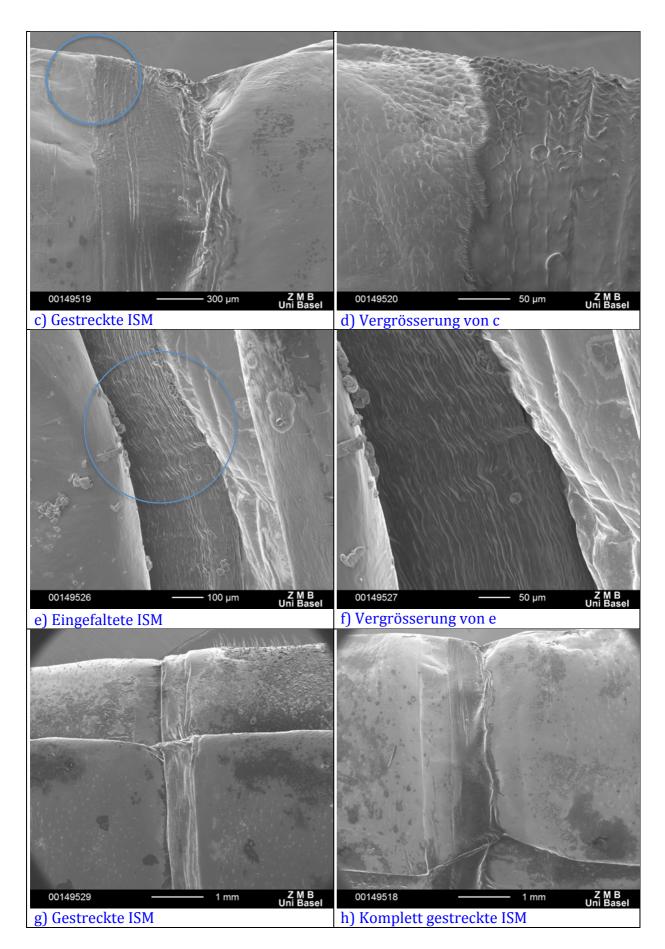


Abb. 69: REM-Aufnahmen des ungedehnten Abdomens der Wanderheuschrecke

Für die folgenden 15 REM-Bilder wurde das Abdomen der Wanderheuschrecke im voraus gedehnt, weshalb die Pleurit- sowie die Intersegmentalmembran (ISM) gut zu sehen sind. Sie zeigen verschiedene Ausschnitte von Übergängen der Sklerite, dabei wird mit unterschiedlichen Vergrösserungen gearbeitet. Unter dem Bild ist jeweils die Referenzlänge angegeben.





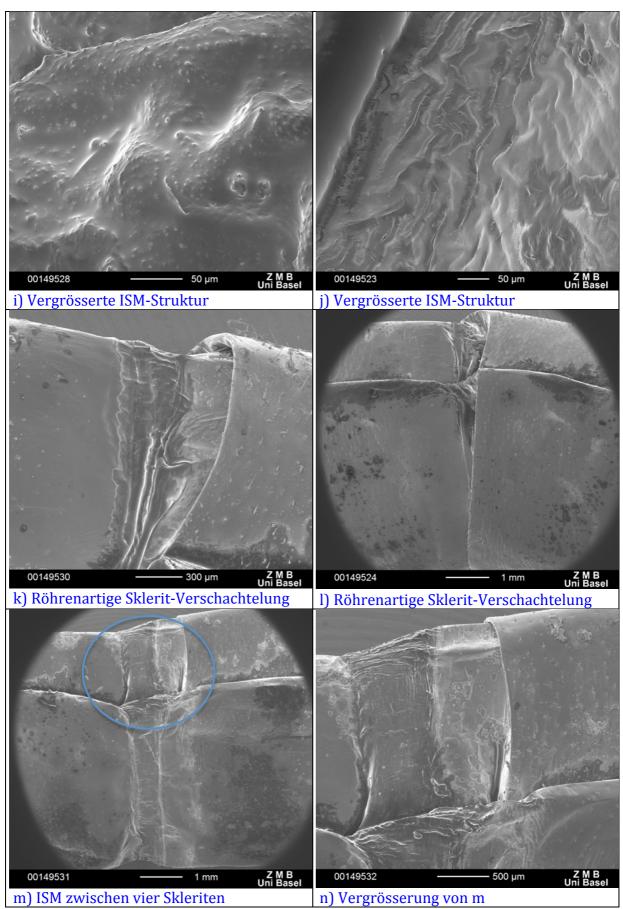


Abb. 70: REM-Aufnahmen des gedehnten Abdomens

In den Bildern a, b, m, n ist zu sehen wie die Skleritplatten mit ISM verbunden sind. Bilder k, l verdeutlichen die röhrenartige Verschachtelung dieser Platten. Die Übergänge der Sklerite und ihre ISM sind besonders gut in den Bildern c, d zu erkennen. Die Einfaltung der ISM zwischen den beiden Skleriten ist in den Bildern e, f zu sehen. Die besondere Oberflächenstruktur der gedehnten ISM ist auf den Bilden i, j erkenntlich. Auf den Bildern g, h ist das Ausmass der Streckung der ISM deutlich ersichtlich.

Abbildung 71 zeigt die Oberflächenstruktur der ISM ($30 \times 30 \mu m$), welche mit dem AFM untersucht wurde. Die Membran zeigt keine auffallende Struktur und ist sehr flach (viel blau).

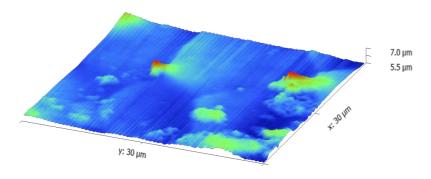


Abb. 71: Oberfläche der ISM aufgenommen mit dem AFM

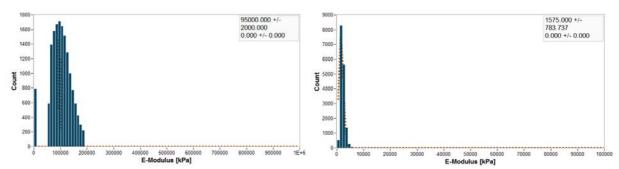
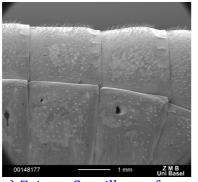


Abb. 72: Steifigkeit der ISM aufgenommen mit dem AFM

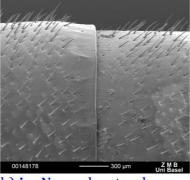
Abb. 73: Steifigkeit des Sklerits aufgenommen mit dem AFM

Aufgrund der AFM-Daten ergeben Berechnungen eine Steifigkeit der obersten 200 nm der ISM von ca. 100 MPa, dies ist relativ steiff (Abb. 72). Hingegen zeigen die obersten 200 nm der Oberfläche des Sklerits eine Steifigkeit von 3-4 MPa, was 25 Mal geringer ist als diejenige der ISM (Abb. 73). Ein interessanter Aspekt der beiden Oberflächen ist die geringe Rauheit.

Sensorik: Nach der Paarung, welche in der freien Natur jahreszeitenabhängig ist, legt das Weibchen die Eier mit einem Schaum, welcher später aushärtet, tief in den feuchten Boden. Mit dem letzten Segment des Abdomens sucht sie eine weiche Stelle, wofür die vielen Sensillen dienen (Abb. 74 c). In den folgenden REM-Bildern sind die Sensillen, welche für die Sensorik essentiell sind, zu sehen. Wie im *Kapitel 5.1.5 Sensorik* beschrieben, leiten diese die Informationen zur Stellung der einzelnen Segmente weiter. Unter den Bildern ist wiederum die Referenzlänge angegeben.



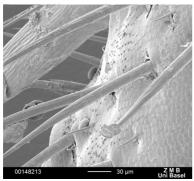
a) Feinste Sensillen auf dem ganzen Abdomen



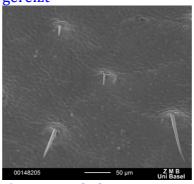
b) Im Normalzustand werden keine Sensillen gereizt



c) Am letzten Segment sind die Sensillen äusserst dicht



d) Dicht behaarte Stellen mit verschieden langen Sensillen



e) Weniger behaarte Stellen mit kurzen Sensillen



f) Viele Sensillen auf Extremitäten und an Übergängen

Abb. 74: REM-Aufnahmen der europäischen Wüstenheuschrecke mit Nova NanoSEM 230

- O Bewegungsfreiheit -intervalle: Wie oft die Weibchen Eier legen, hängt stark von den Umwelteinflüssen ab. Bei jeder Bewegung werden einzelne Segmente in der Position verändert, was zur Streckung resp. zum Zusammenziehen der Membranen führt. Durch hydraulischen Druck werden aber nur das Abdomen und eventuell die Beine bewegt. Ob die Beinen einen hydraulischen Strecker haben wird derzeit noch untersucht. Die hydraulischen Gelenke der Wanderheuschreckenabdomen zeugen von unbestimmter konzentrierter Nachgiebigkeit mit Faltung und Dehnung.
- Zusammenhang Form Funktion Aktuatorik Sensor: Das Zusammenspiel von Muskeln und Hydraulik ist Voraussetzung für ein leichtes und platzsparendes Gelenk. Durch die Reize der Sensillen können die Position und die weiteren Aktionen geplant werden. Es ist sehr wichtig, dass die Streckung reversibel ist. Weil das Abdomen der Heuschrecken ziemlich gross ist und sich darin viele wichtige Organe befinden, muss es gut geschützt sein. Die festen Skleritplatten übernehmen im Normalzustand diese Funktion. Da diese enorme Streckung den Ausnahmezustand darstellt, hat sich die Heuschrecke in der Evolution sehr passend an die Gegebenheiten angepasst.

7.2 Spinnen, am Beispiel der Erdfinsterspinne







b) Spinne mit angezogenen Beinen

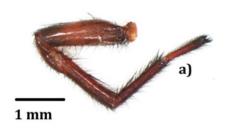


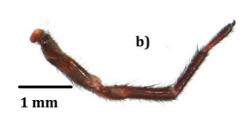
c) Spinne seitlich mit gestreckten Beinen



d) Spinne seitlich mit angezogenen Beinen

Abb. 75: Erdfinsterspinne (Coelotes terrestris) Binokular-Aufnahmen (Leica Mz 125, Leica), Aufsatzkamera (AxioCam MRc%, Zeiss), bearbeitet mit Photoshop; Alle Bilder der Erdfinsterspinne sind in Zusammenarbeit mit Isabell Schmauder gemacht worden





- o **Allgemeine Information:** Die Spinnen (*Araneae*) besitzen acht Beine und ihr Körper ist in zwei Segmente gegliedert. Die Beinextremitäten sind siebengliedrig (Coxa, Trochanter, Femur, Patella, Tibia, Metatarsus, Tarsus) und dienen der Fortbewegung. 123,124
- o **Funktion:** *Bewegung:* Zwischen den einzelnen Beinsegmenten sind Gelenke für ein effizientes Bewegungssystem verantwortlich. Die elastische Gelenkmembran erlaubt als Bindeglied beider harten Cuticulasegmente die Bewegung der Gelenke.¹²⁵

Abb. 76: Spinnenbein Lichtmikroskop-Aufnahmen: a) angezogen, b) gestreckt

¹²³ http://de.wikipedia.org/wiki/Spinne

¹²⁴ https://www.youtube.com/watch?v=GojpKo7XLiY&list= PL2017A89796441B37

¹²⁵ Autonomes Laufen, R. Blickhan, S. Petkun, T. Weihmann, M. Karner, S. 19-45

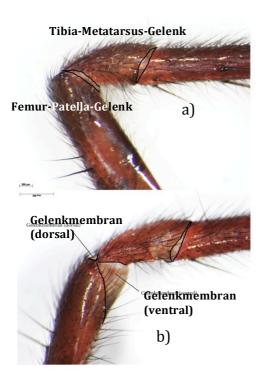


Abb. 77: Spinnenbein Lichtmikroskop-Aufnahmen: a) angezogen, b) gestreckt

o **Aktuatorik:** Hydraulik und Muskulatur: Die Strecker der Femur-Patella- und Tibia-Metatarsus-Gelenke werden durch Hydraulik gestreckt und die Muskulatur übernimmt die Funktion des Beugers. Die Druckerhöhung wird Vordersegment muskulär aufgebaut. wodurch dessen Volumen und der Beininnendruck verändert werden. Das Spinnenbein streckt sich. Die Körperflüssigkeit (Hämolymübernimmt dabei die hvdraulische Leistung. Das Zusammenspiel von Hydraulik und Muskulatur ermöglicht es, dass das Spinnenbein leicht, lang, dünn und gleichzeitig schnell, beweglich und stabil ist. 126

Das Femur-Patella-Gelenk besteht aus einer dorsalen und ventralen Gelenkmembran. Die ventrale hat eine Dreiecksform und ist drei- bis vierfach gefaltet. Die Gelenkmembran ist vergleichbar mit einem Blasbalg: Die Membran verschliesst den Gelenkraum luftdicht und schafft damit die Voraussetzung für das hydraulische System. Dieses ermöglicht durch Streckung der Falten die Beweglichkeit der Gelenke.

Das Patella-Tibia-Gelenk weist keine Faltung auf, sondern nur ein dünnes elastisches Band. Dieses bietet weniger Bewegungsfreiheit, ist aber gut geschützt. Das Gelenk ist für die Feinsteuerung der Beine verantwortlich und braucht nicht wie das Femur-Patella-Gelenk grosse Bewegungsfreiheit.¹²⁷

126 http://www.naturfotos-naeher-hingeschaut.de/kat5-3-springspinnen.php

 $^{^{\}rm 127}$ Mit bildgebenden Verfahren vom biologischen Vorbild zum 3D-Modell am Beispiel von coelotes terrestris, Bacholorarbeit, I. Schmauder

Oberflächenstruktur und Aufbau der Cuticula des Spinnenbeins

Die folgenden REM-Aufnahmen wurden in Zusammenarbeit mit Isabell Schmauder erstellt.

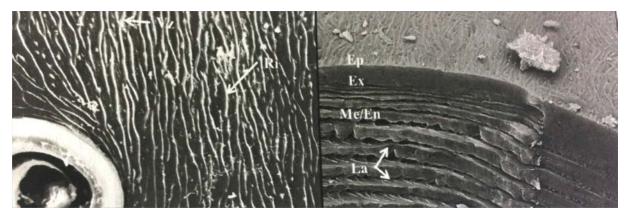


Abb. 78: REM-Aufnahme der Erdfinsterspinnen-Cuticula; links: Cuticula-Oberfläche (40 μ m), rechts: Schnitt durch die Cuticula (15 μ m) Vz = Verzweigungen, Ri= Epicuticupa-Rippen, Ep = Epicuticula, Ex = Exocuticula, Me/En= Meso- und Endocuticula, La = Lamellen

Links ist die rippenartige Oberflächenstruktur und rechts der Cuticulaaufbau der Beinsegmente der Erdfinsterspinne zu sehen.

Oberflächenstruktur der Gelenkmembranen des Femur-Patella-Gelenks



Abb. 79: REM-Aufnahmen der Oberfläche der Erdfinsterspinnen-Gelenkmembran; links: Ventrale Gelenkmembran (50 μ m), rechts: dorsale Gelenkmembran (10 μ m), Pa= papillenartige Erhöhung

Die ventrale und dorsale Gelenkmembran weisen eine andere Oberflächenstruktur auf als diejenige der Cuticula der Beinsegmente. Anstatt einer rippenartig strukturierten Oberfläche, sind die Membrane mit dicht vorkommenden papillenartigen Erhöhungen zu erkennen. Im Vergleich der ventralen Gelenkmembran (Abb. 79, links) mit der dorsalen (Abb. 79, rechts) zeigt sich, dass die Erhöhungen der ventralen dichter beeinander liegen als die der dorsalen. Die ventrale Membran weist durchschnittlich 2-3 Erhöhungen pro 2 μ m² und die dorsale 4-5 pro 2 μ m² auf.

Oberflächestruktur des Übergangs am Femur-Patella-Gelenk

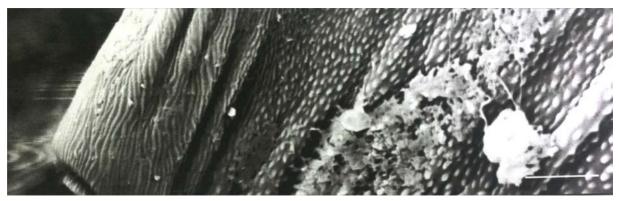


Abb. 80: REM-Aufnahmen der Oberfläche des Übergangs des Femur-Patella-Gelenks (70 μm)

Die Abb. 80 zeigt einen Übergang von der Cuticula der Beinsegmente im Bereich eines Gelenkes. An dieser Stelle geht die rippenartige Oberflächenstruktur der Cuticula in die papillenartige Oberflächenstruktur der Membran über.

- Sensorik: Die Beinsensillen (Abb. 77) spielen bei den Bewegungsvorgängen eine grosse Rolle. Beinstacheln gibt es am ganzen Bein, diese stellen sich bei erhöhtem Blutdruck auf und geben nur dann Informationen weiter. Die Spaltsinnesorgane sind im Exoskelett eingebettet und sondieren die Verformung, die durch Belastung und Spannung der Stellung der Beine und Gelenke auftritt. Im Gelenk gibt es Sinneszellen, welche die Informationen zur Stellung, Bewegung und Geschwindigkeit weiterleiten.¹²⁸
- O Bewegungsfreiheit -intervalle: Spinnen sind unglaublich beweglich und können ihre dünnen Beine unabhängig voneinander blitzschnell einziehen oder ausstrecken. Auf diese Schnelligkeit ist die Spinne angewiesen, damit sie ihre Beute packen resp. vor dem Feind fliehen kann. Zusätzlich können die einzelnen Beinsegmente unabhängig voneinander bewegt werden, was einen enormen Bewegungsradius bewirkt. Die Spinnenbeingelenke können dadurch sehr feine und präzise Bewegungen ausführen.¹²⁹ Das Spinnenbein steht als Beispiel für die bestimmte konzentrierte Nachgiebigkeit. Ihre Beine besitzen Scharniergelenke.
- Zusammenhang Form Funktion Aktuatorik Sensorik: Da die Spinnen in ihren Gelenken den hydraulischen Druck nutzen, haben sie fast keine Verzögerungszeit und können sofort reagieren. Erstaunlich ist, dass die Spinne je nach Aufgabe der Gelenke unterschiedliche Membranen hat. Würden Muskeln sowohl für die Beugung und Streckung der Beingelenke zuständig sein, wäre das Bein um einiges dicker und schwerer, was wiederum zur Verlangsamung führt. Die verschiedenen Ausprägungen von Informationssensoren bei Spinnenbeinen ermöglichen eine äusserst effiziente Sensorik. Die Hydraulik ist Voraussetzung für ihre langen, dünnen und leichten Beine, diese wiederum erlauben eine optimal ans Gelände angepasste Fortbewegung. Die fehlende Streckmuskulatur lässt viel Raum für den Beugermuskel. Gleichzeitig eignet sich dieser Bewegungsapparat gut zum Beutegreifen, zu hängenden Fortbewegungs-

 128 Mit bildgebenden Verfahren vom biologischen Vorbild zum 3D-Modell am Beispiel von coelotes terrestris, Bacholorarbeit, I. Schmauder, S. 2-5

_

¹²⁹https://www.youtube.com/watch?v=GojpKo7XLiY&list=PL2017A89796441B37

formen und für den Springmechanismus. Mit der Hydraulik und der Ausrichtung der Beine kann die Spinne schnell los springen. All dies stellt ein sehr bewegliches und gut steuerbares Konstrukt dar, was für das sichere Greifen der Beute wichtig ist. Beim Druckaufbau werden mehrere Gelenke gleichzeitig bewegt. Insgesamt sind die Spinnenbeine hoch spezialisiert und gut optimiert.

Des weitern besitzen viele Arthropoden hydraulisch gesteuerte Begattungsorgane. Folgend wird das der Spinne näher beschrieben.

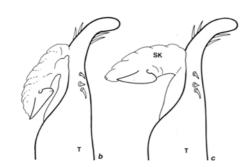


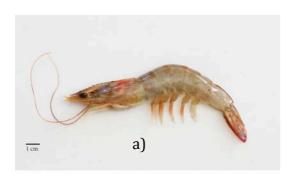
Abb. 81: Männliches Glied Spinne (Gonyleptidae)

Begattungsorgan: Die männlichen Begattungsorgane besitzen oft Haken, Zähnchen oder durch hydraulisch Hämolymphdruck ausstülpbare Strukturen (Abb. 81), die oft genau entsprechende Widerhaken bzw. Vertiefungen in der weiblichen Genitalkammer hineinpassen, also dem Schlüssel-Schloss-Prinzip entsprechen. Die Komplexität vieler Begattungsorgane soll der sexuellen Selektion dienen und als Konsequenz der versteckten Weibchenwahl. Viele männliche Begattungsorgane haben noch eine weitere wichtige Funktion, im Weibchen fest und sicher verankert zu sein, um gegenüber anderen stabile Verankerungsposition Männchen eine beibehalten zu können. So gesehen sind die komplexen Strukturen dieser Organe vor allem eine Konsequenz des Konkurenzkampfs der Männchen. 130 In folgender Arbeit sind viele von hydraulischen Beispiele männlichen Geschlechtsorganen bei Spinnen beschrieben und systematisch geordnet.¹³¹

¹³⁰ http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/begattungsorgane/7775&_druck=1 131 http://www.museunacional.ufrj.br/mndi/Aracnologia/pdfliteratura/Martens/Marte

ns%201986%20Grossgliederung.pdf

7.3 Krebstiere am Beispiel der Nordseegarnele



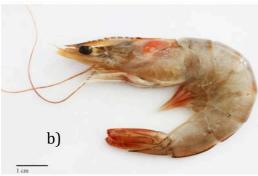


Abb. 82: Garnele Makroaufnahme a) gestreckt, b) zusammengezogen

- o **Allgemeine Information:** Die Krebse *(Crustacea)* bilden einen Unterstamm der Arthropoden und leben fast ausschliesslich im Wasser. Sie sind wie die Arthropoden segmentiert, jedoch ist ihr Exoskelett meist mit Calciumcarbonat verfestigt. So wird ihr Panzer noch härter und schützt das Tier optimal. ^{132,133}
- o **Funktion:** Wachstum und Bewegung: Garnelen (Crangon crangon) besitzen wie alle Krebstiere und die meisten Arthropoden ein Exoskelett. Dieses ist nur in geringem Masse dehnbar. Damit die Garnelen trotzdem wachsen können, muss es von Zeit zu Zeit abgeworfen werden, analog den meisten Arthropoden.

Wird das Exoskelett zu eng, so wird die Häutungsdrüse aktiviert, welche das Häutungshormon Ecdyson ausschüttet. Es signalisiert dem Organismus, sich auf die Häutung vorzubereiten. In Folge werden dem Panzer Mineralien entzogen, damit dieses weicher wird. Darunter bildet sich bereits der

neue Panzer. Vor der Häutung werden die Tiere sehr ruhig und verstecken sich meist zwischen den Pflanzen. Der Häutungsvorgang geschieht innerhalb weniger Sekunden, dabei bricht der Panzer an der Körperoberseite auf und die Garnele schlüpft heraus. Die neue Aussenhaut ist noch weich, weshalb sich die Garnelen bis zur Aushärtung des Panzers vestecken. Solange der Panzer noch weich ist nimmt er Wasser auf und dehnt sich. Später werden die Mineralien, die der alten Haut entzogen wurden, in den neuen Panzer wieder eingelagert. Dadurch erhält die neue Aussenhaut wieder die schützende Härte und Festigkeit. Um aus dem alten Exoskelett wichtige Stoffe wieder zu verwerten, frisst die Garnele oft ihre alte Haut. Die nächste Häutung steht an, sobald der neue Panzer wieder zu klein ist. Ein interessanter Nebeneffekt der Häutung ist, dass fehlende oder beschädigte Gliedmassen nachwachsen. 134,135,136

Laut Dipl.-Ing. Gundula Schieber, vom IKTE an der Universität Stuttgart, sind hydraulische Systemen in Krustentieren auch für normale Bewegungen bekannt. Leider konnten keine weiteren verlässlichen Quellen dazu gefunden werden.

60

¹³² http://de.wikipedia.org/wiki/Krebstiere

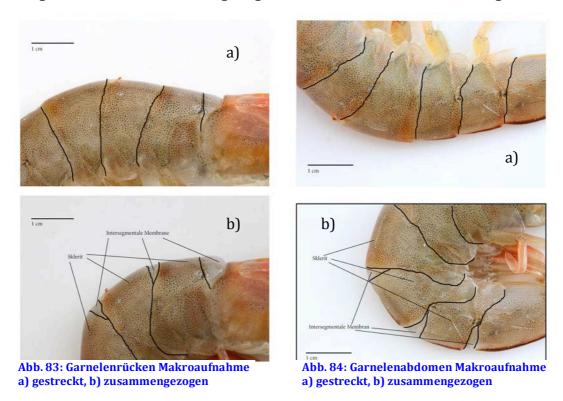
¹³³ http://de.wikipedia.org/wiki/Garnele

¹³⁴ Reinhard Pekny, Chris Lukhaup: Süßwassergarnelen, 4. Auflage 2011, GU

¹³⁵ http://de.wikibooks.org/wiki/Haltung_von_Süßwassergarnelen:_Häutung

¹³⁶ http://skeletalphylum.weebly.com/arthropoda.html

Aktuatorik beim Wachstum: passive Hydraulik durch Osmose: Wie bereits erwähnt, nimmt die Garnele während der Sklerotisierung durch Osmose Wasser in ihren Körper auf, welches sie wachsen lässt. Dieser Prozess dauert etwa zwei Tage. Der fertig ausgehärtete Panzer bietet so genügend Platz bis zur nächsten Häutung.



Aktuatorik bei der Bewegung: *Muskulatur und Hydraulik:* Mit einem Makroobjektiv wurden Aufnahmen von natürlichen Schwimm- und Laufbewegungen erstellt (Abb. 83, 84). Gut zu sehen sind die überlappenden Sklerite. Wenn die Tiere sich stark krümmen kommen die ISM zum Vorschein. Diese sind jedoch fester und somit weniger elastisch als bei den Heuschrecken. Der äussere Aufbau des Garnelenabdomens gleicht dem der Heuschrecken.

Wie vom Kulinarischen bekannt sein dürfte, ist die Garnele mit vielen Muskeln ausgestattet. Das hydraulische System der Garnelen wird in der Nähe des Blutkreislaufsystems erwartet, konnte aber nicht nachgewiesen werden, weil es bei toten Tieren schnell zusammenfällt. Sicher ist, dass die Muskulatur den Hauptteil der Bewegungen vollbringt und die Hydraulik eher eine Nebenrolle spielt.

Sensorik: Auch im Bereich der Sensorik ist noch viel unerforscht. Es konnte nicht herausgefunden werden, wie die Garnelen Information zu ihrer Position erhalten. Vermutet wird, dass es Sensoren in den Muskeln gibt, welche die Lage der Muskeln bestimmen. Vermutet wird, dass Wasserströmungen wahrgenommen werden.

O Bewegungsfreiheit -intervalle: Die Anzahl und Intervalle der Häutungen sind je nach Art unterschiedlich. Im Schnitt häuten sich Zwerggarnelen alle vier bis sechs Wochen, grössere Garnelen haben deutlich längere Häutungsintervalle. Generell hängt die Häufigkeit von folgenden Punkten ab:

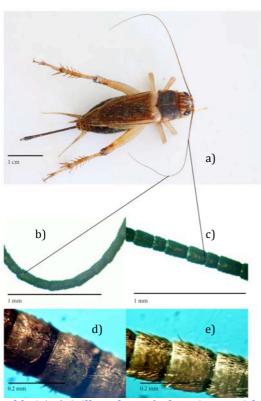
- Mit zunehmenden Alter werden die Abstände grösser, da die Garnelen langsamer wachsen
- Je höher die Temperatur, desto höher die Häutungsfrequenz, da hohe Temperaturen das Wachstum begünstigen
- Zu proteinreiche Ernährung führt zu verfrühten Häutungen¹³⁷

Die Häutung stellt eine verteilte Nachgiebigkeit dar, welche sich ausdehnt. Die hydraulische Bewegung ist eine unbestimmte konzentrierte Nachgiebigkeit, welche durch Dehnung und Faltung erzeugt wird.

o **Zusammenhang Form – Funktion – Aktuatorik – Sensorik:** Leider ist bei den Krebstieren noch vieles unerforscht. So ist weder genau geklärt wie die Osmose bei der Häutung abläuft, noch sind die hydraulischen Bewegungssysteme bekannt.

¹³⁷ http://de.wikibooks.org/wiki/Haltung_von_Süßwassergarnelen:_Häutung

7.4 Geisselantenne der Heimchen



- o **Allgemeine Information**: Die Antennen befinden sich paarig an der Stirn der meisten Arthropoden und dienen der Sensorik. Zwei Antennenarten sind zu unterscheiden: Gliederantenne und die Geisselantenne. Die Gliederantenne wird ausschliesslich mit Muskeln bewegt. Wie alle sechsfüssigen Arthropoden besitzt das Heimchen (Acheta domesticus) ebenfalls zwei Geisselantennen. Im folgenden Abschnitt wird Geisselantenne nur die untersucht, da sie neben Muskeln auch noch durch Hydraulik bewegt wird. 138
- o **Funktion:** Bewegung der Antennen: Die Antennen werden hauptsächlich zum Tasten und Riechen verwendet und haben eine Vielzahl von weiteren wichtigen Aufgaben, darum müssen sie aktiv bewegbar sein. Einerseit müssen die ganzen Antennen bewegt werden, andererseits jedes Glied einzeln. Da die Antennenstruktur sehr dünn ist, gibt es keine Muskeln. 139

Abb. 85: a) Grille Makroaufnahme Canon; Lichtmikroskop-Aufnahmen der Antenne b) gebogen, c) normal, sowie in grösserer Vergrösserung d) gebogen, e) gestreckt

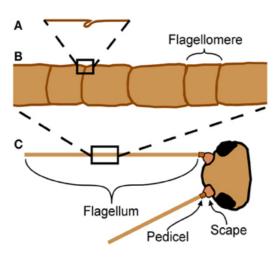


Abb. 86: Aufbau der Grillenantenne

o **Aktuatorik:** *Muskulatur und Hydraulik:* Die Geisselantenne ist wie folgt aufgebaut (Abb. 86): das erste Segment, das Scapus, ist durch intersegmentale Membran an der Stirn festgemacht. Das Scapus ist durch Muskulatur mit dem zweiten Segment, dem Pedicellus verbunden. Alle weiteren Segmente werden zum Flagellum gezählt. Ab dem Pedicellus gibt es keine Muskeln mehr. Das Flagellum der Heimchen ist besonders lang, es werden über 100 Segmente gezählt.

Diese Segmente werden durch den Druckunterschied der Hämolymphe (Blut) aktiv bewegt. Ein Herzmuskel an der Basis der Antenne gelegen, pumpt die Hämolymphe in die Antenne und erzeugt so den hydraulischen Druck. Eine feine und flexible Membran, welche eine nach innen gelegte Falte aufweist, verbindet alle Segmente (Abb. 86, A).^{140, 141}

¹³⁸ Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/H. Weidner, S. 56-57

¹³⁹ http://de.wikipedia.org/wiki/Fühler_(Biologie)

¹⁴⁰ http://what-when-how.com/insects/anopheles-mosquito-insects/

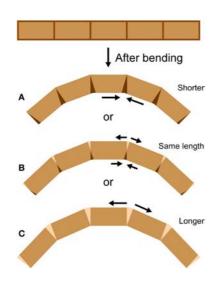
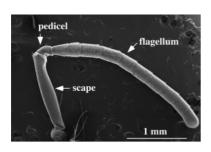
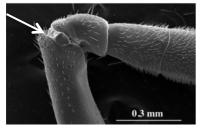


Abb. 87:Mögliche Bewegungsarten der Antennensegmente

Wie in der Arbeit von Catherine Loudon, Jorge Bustamante, Jr. und Derek W. Kellogg, unter dem Namen Cricket antennae shorten when bending (Acheta, domesticus L.)', welche am 26. Juni 2014 erschien, beschrieben, ist noch nicht gesichert bekannt, wie sich die einzelnen Antennensegmente gegenseitig bei Bewegungen verhalten. In der Abbildung 87 sind die möglichen Bewegungsformen dargestellt. In den Lichtmikroskop-Aufnahmen (Abb. 88) ist zu sehen, dass beim Dehnen der Antenne die Intersegmentalhäute sichtbar werden. Anzunehmen ist darum, dass die Intersegmentalhäute dort zum Vorschein kommen, wo sie gestreckt werden. Auf der gegenüberliegenden Seite werden die Segmente weiter ineinander verschachtelt (B).¹⁴²





o **Sensorik:** Über die Antennen nehmen die Tiere vielseitige Informationen wahr. Sie analysieren ihre Umgebung und leiten diese Informationen dem Hirn weiter. Vor allem chemische (z.B. Pheromone) und physikalische (z.B. Luftströmungen) Reize werden durch die Fühler erkannt. Auf diesen befinden sich winzige Sensillen (Abb. 88), welche Mechano- und Chemosensoren beinhalten. An dieser Stelle soll noch das Johnstons Organ (s. Abb. 88, weisser Pfeil) beschrieben werden. Dies ist ein weiteres Sinnesorgan, im Pedicellus vorkommt. Es Vibrationen der Antenne wahr und ist somit für den Flug essentiell. Einige Zweiflügler können damit sogar hören. 143, 144

Abb. 88: Antenne mit Johnstons Organ und Sensillen

- o **Bewegungsfreiheit -intervalle:** Die Sinnesorgane auf den Antennen liefern den Heimchen laufend vielseitige Informationen zur Orientierung.
- Zusammenhang Form Funktion Aktuatorik Sensorik: Damit die Antennen so lang und beweglich sein können, müssen sie extrem leicht gebaut sein, v.a. wenn sie über 100 Segmente lang sind, wie bei den Heimchen. Analog zu den Spinnenbeinen verursacht auch hier der Hämolymphdruck die Hydraulik. Je kleiner die hydraulischen Kammern, desto schneller ist die Bewegung. Folglich können die Antennen der Heimchen schnell und präzise bewegt werden, was bei Tierstudien mit lebenden Tieren gut ersichtlich war. Die Geisselantenne stellt ein Beispiel für eine unbestimmte konzentrierte Nachgiebigkeit duch Dehnung und Faltung dar.

¹⁴¹ Encyclopedia of Insects, Vincent H. Resh, Ring T. Cardé, S. 22-23

¹⁴² http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4071997/

¹⁴³ http://de.wikipedia.org/wiki/Johnstonsches_Organ

¹⁴⁴ http://what-when-how.com/insects/anopheles-mosquito-insects/

Ergänzend werden einige Arthropoden beschrieben, welche mit Versuchstieren nicht untersucht werden konnten, weil sie nicht erhältlich sind.

7.5 Honigtopfameise, Wander- und Weberameise, allg. Arbeiterinnenameise mit Aufgabe der Nahrungssuche¹⁴⁵





Abb. 89: Im Honigtopfameisennest

Abb. 90: Honigtopfameisen (Campondious Inflamis, Myrmecocystus mexicanus) gefüllt mit Honig

- Allgemeine Information: Ameisen leben in Staatengemeinschaften und übernehmen dabei verschiedene Aufgaben. Sie passen sich diesen an, entsprechend variiert ihre Grösse je nach Art und Status.¹⁴⁶
- Funktion: Vorratsspeicher: Für die Nahrungsspeicherung gibt es bei einigen Ameisen einen extrem dehnbaren Kropf im Abdomen, der als Erweiterung des Vorderdarms die meiste Nahrung speichert. Später wird diese im Nest in den Mund zurückgewürgt (Regurgitieren) und dort den hungrigen Ameisen und der Königin verfüttert (Abb. 89). So kann eine Arbeiterinnenameise viele Ameisen verpflegen, welche selber nicht auf die Nahrungssuche gehen müssen (Abb. 90). Die Ameise selbst verbraucht nur einen kleinen Teil der Nahrung.^{147,148}

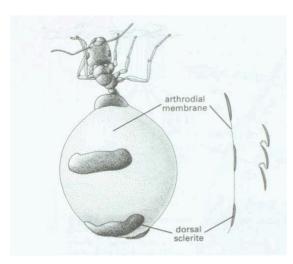
65

¹⁴⁵ Die Ameisen Biologie und Verhalten, Walter Kirchner

¹⁴⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Ameisen

¹⁴⁷ Die Ameisen Biologie und Verhalten, Walter Kirchner, S. 21, 23

¹⁴⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Honigtopfameisen



o **Aktuatorik**: reversible Hydraulik: gepanzerte Abdomendecke der Ameisen weist eine z. T. enorme Dehnbarkeit auf, dies aufgrund ihrer Struktur und Zusammensetzung. Feste sich überlappende Rücken- und Bauchplatten (s. Abb. 91 dorsal sclerite) sind mit extrem elastischen Intersegmentalmembranen (s. Abb. 91 arthrodial miteinander membrane) verbunden. Ausdehnung kann enormes Ausmass annehmen, wenn mehr Platz gebraucht wird. Diese Dehnung ist reversibel, das heisst das Abdomen kann wieder in die Ursprungsform zurückkehren (s. Abb. 91 links: gedehnte Haut durch Hydraulik, rechts: Normalzustand).149

Abb. 91: links: Spezialisierte Honigtopfameise mit Honig im dehnbaren Abdomen, rechts: Abdomenhaut gedehnt und im Normalzustand

- Sensorik: Differenzierung: In der Individualentwicklung (Ontogenese) wird entschieden, welches Geschlecht und welche Aufgaben eine Ameise später haben wird. Die Differenzierung jedes Individuums hängt von vielen Faktoren ab, wobei die genetische Veranlagung selten relevant ist. Der Juvenilhormonspiegel hat ebenfalls eine bedeutende Auswirkung auf die Entwickung der Eier und Larven. Nach Hölldebler sind folgende Faktoren entscheidend:
 - Ernährung: Menge und Qualität der Nahrung, eventuell besondere Nahrungssekrete aus den Futterdrüsen
 - Temperatur
 - Feuchte
 - Tageslänge
 - Kastenselbstinhibition: Individuen einer Kaste verhindern die Entstehung weiterer Individuen derselben Kaste (Königinentwicklung)
 - Grösse und Dottergehalt der Eier
 - Alter der Königin^{150,151}

Warum genau die Arbeiterinnen ihren spezifischen Aufgaben nachgehen und wie diese über den Tag und das Jahr reguliert werden, ist noch wenig erforscht. Jedoch haben Ameisen ein eigenes Kommunikationssystem, welches bei der Nahrungssuche von äusserster Wichtigkeit ist.

Bewegungsfreiheit -intervalle: Honigtopfameisen (Sammelbegriff für diverse Ameisensorten) suchen in extremen Lebensräumen (Wüste, Steppe, Karstgebirge v.a. in Mexiko, Südamerika und Australien) nach zuckerhaltigen Säften. Diese stehen nur temporär zur Verfügung und werden dann in Überschuss gesammelt und im Kropf der Nahrungsarbeiterinnen gespeichert. Der anschwellende Kropf lässt das Abdomen immer grösser werden, die Ameisen sehen wie Honigtöpfe aus. Da das Abdomen der vollen Arbeiterinnen so gross ist (bis Erbsengrösse), können sie nicht mehr laufen und hängen wochenlang bewegungslos an der Nestdecke. Bei Futterknappheit in der

¹⁴⁹ Die Ameisen Biologie und Verhalten, Walter Kirchner, S. 21

¹⁵⁰ http://de.wikipedia.org/wiki/Ameisen#Typbestimmende_Faktoren

¹⁵¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Bert_Hölldobler

Trockenheit, regurgiert die Ameise den zuckerhaltigen Nährstoff. Ein voller Kropf kann etwa 100 hungrige Ameisen während 14 Tagen in nahrungsarmen Zeiten ernähren. Ein ganzer Bau kann so bis zu 250 g Honig speichern! Die Honigtopfameisen sind ein sehr gutes Beispiel für eine verteilte Nachgiebigkeit durch Ausdehnung.

 Zusammenhang: Form - Funktion - Aktuatorik - Sensorik: Die Speicherung von Nahrungsmitteln im Abdomen verschiedener Ameisenarten, besonders gut sichtbar bei den Honigtopfameisen, funktioniert bestens. Das Zusammenspiel der einzelnen Faktoren ist gut angepasst. Es versteht sich von selbst, dass dieser Vorgang reversibel sein muss.

Weitere Arthropoden mit einem ausgeprägten reversiblen Hydrauliksystem und einer verteilten Nachgiebigkeit der Gelenke duch Dehnung sind beispielsweise Mücken, Milben, Kopfläuse, Bettwanzen und Zecken. Diese Blutsauger kennen wir als Parasiten. Sie nehmen mit ihrer Blutmahlzeit in Kürze eine maximale Menge Blut zu sich, damit sie sich davon lange ernähren können. Sie speichern die erworbene Nahrung in ihrem extrem dehnbaren Abdomen. 155, 156, 157 So kann die Zecke auf das 20-fache ihres ursprünglichen Volumens und auf das bis zu 100-fache ihres Gewicht duch das Blutsauen heranschwellen.

Alle Membrane des Abdomens dieser Blutsauger weisen eine extreme Dehnbarkeit auf. Nur die Zecken besitzen keine sklerotisierten Platten (Abb. 96, 97). Auch diese Tiere sind bestens an ihre Lebensweise angepasst: Sie führen ihre Nahrung stets im dehnbaren Abdomen mit.

67

¹⁵² Die Ameisen Biologie und Verhalten, Walter Kirchner, S. 48-49

¹⁵³ http://de.wikipedia.org/wiki/Honigtopfameisen

¹⁵⁴ Amerika und die Welt der Ameisen, Maximilian Fischer, 1994

¹⁵⁵ Kosmos Insektenführer, J. Zahradnik, S. 35-36

¹⁵⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Parasitismus

¹⁵⁷ Insekten Mitteleuropas, M. Chinery, S. 135





Abb. 92: Stechmücke mit vollem Abdomen





Abb. 93: Milbe



Abb. 94: Kopflaus



Abb. 95: Bettwanze



Abb. 96: Vollgesogene Zecke

Abb. 97: Zecken im Grössenvergleich, links: vollgesogenes Abdomen, rechts: kein Blut im Abdomen

7.6 Termiten- und Ameisenkönigin



Termiten

Arbeiter Soldat König Königin

Abb. 98: Termitenkönigin mit Pflegeameisen (Isoptera)



Abb. 99: Grössenvergleich der differenzierten Termiten (Isoptera)

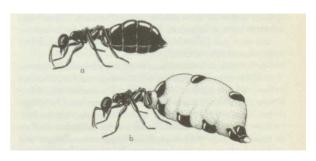


Abb. 100: Ameisenkönigin mit Arbeiterinnen

Abb. 101: Unterschiedliche Dehnung des Abdomens der Ameisenkönigin a) ohne Eier und b) mit Brut

- Allgemeine Information: Die Königinnen der Ameisen und Termiten befinden sich an der Spitze der hierarchischen Staatengemeinschaft. Sie sind die Grössten und alle haben sich ihr unter zu ordnen. Die einzigen Aufgaben der Königin sind einerseits die Eiablage zu sichern und andererseits den Staat zu überwachen und zu koordinieren.^{158,159}
- Funktion: Fortpflanzung: Wie bereits bei den Honigtopfameisen beschrieben, wird durch Differenzierung die Funktion der Ameise resp. des Termits bestimmt. Die Königin ist das einzige Weibchen, welches fortpflanzungsfähig ist und Eier legen kann. Somit ist sie für den Fortbestand des ganzen Staates verantwortlich und muss viel Nachwuchs erzeugen. Königinnen sind grösser als ihre Artgenossen und zur Beschleunigung der Eiproduktion wachsen die Eier, wie in einem Brutkasten, im aufgeschwollenen Abdomen heran. 160,161,162

69

¹⁵⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Termiten

¹⁵⁹ https://www.voutube.com/watch?v=zlgpU9a70PE

¹⁶⁰ http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040816682900349

¹⁶¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Termiten#Geschlechtstiere

¹⁶² http://www.wissen.de/lexikon/termiten

- O **Aktuatorik:** *reversible Hydraulik:* Das in harte Platten segmentierte Abdomen der Könniginnen der Ameisen resp. Termiten weist eine enorme Dehnbarkeit auf. Bei ihnen kann das Abdomen bis zu 500-1000% im Vergleich zur Originalgrösse ausdegehnt werden. Dies aufgrund ihrer Struktur und Zusammensetzung. Sklerotisierte, sich überlappende Rücken- und Bauchplatten sind mit extrem elastischen ISM miteinander verbunden. Ihre Ausdehnung kann enormes Ausmass annehmen, wenn mehr Platz für die heranwachsenden Ovarien gebraucht wird. Die Ovariolen (Eiröhren) der Königin werden grösser, sobald sie fruchtbar ist. Das ganze Abdomen wird gedehnt. Oft bleibt das Abdomen der Königin gedehnt, da sie laufend Eier legt, doch die Dehnung ist reversibel. 163,164
- O **Sensorik:** *Differenzierung:* Durch Ontogenese findet die Differenzierung jedes Individuums statt. Für die Königinentwicklung ist dabei v.a. ein Gen essentiell. Der Juvenilhormonspiegel hat ebenfalls eine entscheidende Auswirkung auf die Entwickung der Königinnen. Die nach *Hölldebler* erkannten Faktoren sind bei der Sensorik der Honigtopfameisen bereits erläutert. 166 Nach dem Hochzeitsflug, welcher nur zu bestimmten Jahreszeiten und Wetterbedingungen stattfindet, befruchtet der König die Königin. Die Paarbildung wird duch Pheromone beschleunigt. Die Kommunikation über den Stand der Brut läuft über soziale Signale und Pheromone. 167
- O Bewegungsfreiheit -intervalle: Die Paarungszeit, sowie die Häufigkeit der Eiablage ist von Art zu Art verschieden. Während der Zeit, in der die Königin die Eier, wie in einem Brutkasten, in ihrem Abdomen trägt, kann sie sich nicht mehr bewegen. Sie wird vollkommen von den Arbeiterinnen versorgt. Ihr Hinterteil kann bis zu 14 cm gross werden. Ein solches physogastrisches Weibchen kann bis zu 30'000 Eier an einem Tag und viele Millionen während ihres Lebens legen. 168, 169 Auch die Königinnen der Termiten und Ameisen nutzen die verteilte Nachgiebigkeit durch Ausdehnung.
- o **Zusammenhang: Form Funktion Aktuatorik Sensorik** Die enorme Ausprägung des Königinnenabdomens ist exzellent an die Aufgabe angepasst. Ihr Staat unterstützt die Königin in dieser anstrengenden Zeit. Wichtig ist die Reversibilität der Hydraulik, denn nur so kann die Königin sich optimal an die Situation anpassen.

 $http://de.wikipedia.org/wiki/Termiten \# Lebenszyklus. 2C_Differenzierung_von_Kasten$

¹⁶³ Die Ameisen Biologie und Verhalten, Walter Kirchner, S. 21

¹⁶⁴ The Insects – An Outline of Entomology, P. J. Gullan/ P. S. Cranston, S. 295-298

 $^{^{165}\,}http://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article8097314/Macht-Geheimnis-der-Termitenkoenigin-gelueftet.html$

¹⁶⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Juvenilhormon

¹⁶⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Termiten

¹⁶⁹ Die Ameisen Biologie und Verhalten, Walter Kirchner

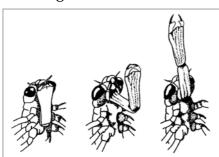
7.8 Libelle



O Allgemeine Information: Die Häutung der Libellen (Odonata) ist eine der bekanntesten im Reich der Arthropoden. Exuvien werden oft an Blättern nahe einem Gewässer gefunden. Ihr Exoskelett verleiht sowohl große Festigkeit als auch hohe Beweglichkeit bei geringem Gewicht: So wiegt eine Kleinlibelle nur gerade 0,025 g und eine Großlibelle etwa 1 g. Bekannt sind die Libellen wegen ihren phänomenalen Flugkünsten.¹⁷⁰

Abb. 102: Libelle während dem Schlüpfen

• Funktion: Wachstum, Nahrungsbeschaffung, Schlüpfen: Die Libelle schlüpft als Larve im Wasser. Dort verbringt sie den Anfang ihres Lebens als Räuber. Sie häutet sich einige Male, wobei dieser Vorgang analog zu den Garnelen geschieht. Solang die Haut noch weich ist, diffundiert Wasser in die Larve, was sie grösser werden lässt. Nach einiger Zeit beginnt mit der vollständigen Metamorphose ein neuer Lebensabschnitt. Sie steigt



aus dem Wasser und wandelt sich in eine fliegende Libelle um. ¹⁷¹ Um zu schlüpfen ist die Libelle ebenfalls auf ihre Hydraulik angewiesen. Als Larve ist die Libelle eher langsam, darum schleicht sie sich an ihre Beute an und packt diese mit der hydraulischen Fangmaske, die blitzschnell reagiert (Abb. 103). ^{172,173,174}

Abb. 103: Hydraulische Fangmaske der Libellen

 $^{^{\}rm 170}$ Die Libellen in den Naturparks Trudner Horn und Rieserferner-Ahrn, Dr. Michl Laimer 2010

¹⁷¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Libellen

¹⁷² http://www.waldzeit.ch/nachhaltigkeit/oekologie/insekten/libellen/libellen-elegante-flugkunstler-gefrassige-rauber/

¹⁷³ http://en.wikipedia.org/wiki/Hemolymph

¹⁷⁴ http://www.libellenwissen.de/wissen/dokumentation/libellenschlupf-metamorphose

- O Aktuatorik: Muskulatur und Hydraulik: An der Luft kommt es zur letzten Häutung. Dazu macht die Libelle pumpartige Bewegungen in der Hülle, so dass die Larvenhaut entlang der Rückennaht platzt. Die Libelle füllt ihren Brustabschnitt weiter mit Körperflüssigkeit, weshalb die Haut immer weiter aufreisst. Sobald sie aus der Larvenhaut geschlüpft ist, muss sie die Flügel stärken. Auch dazu pumpt sie die Körperflüssigkeit in die Flügeladern, welche sie nach dem Erhärten dieser wieder zurückzieht, um sie anschliessend in den Hinterleib zu pumpen. Nach dem Erhärten des Abdomens wird die 'Pumpflüssigkeit' durch den Darm tropfenweise ausgeschieden. So gibt sie den unnötigen Balast ab. Das Schlüpfen dauert zwei bis drei Stunden, dann ist das Tier soweit ausgehärtet, dass es den gefährlichen Jungfernflug antreten kann. Nur die leere Larvenhülle bleibt zurück. Das Schlüpfen ist die gefährlichste Phase im Leben einer Libelle, da das Tier beinahe wehrlos jedem Angreifer ausgeliefert ist. Darum ist es von Wichtigkeit, dass der hydraulische Vorgang bis zum Abflug möglichst kurz ist. 175,176
- Sensorik: Auch die Libellen besitzen eine Vielzahl von Sensillen auf ihrer Exocuticula. Die verschiedenen Lebensabschnitte werden hormonell gesteuert.
- Bewegungsfreiheit -intervalle: Die Zeit als Libellenlarve dauert je nach Art zwischen vier Monaten und fünf Jahren. Nach sieben bis fünfzehn Häutungen ist die Larve herangewachsen und genügend entwickelt, damit sie das Gewässer verlassen kann und ihr Leben als fliegende Libelle weiter führen kann. Die Häutungen sind hormonell bedingt.¹⁷⁷
- Zusammenhang Form Funktion Aktuatorik Sensorik: Die Libelle vereint gleich mehrere hydraulische Mechanismen. Bei der Häutung als Larve wird analog der Garnele die Hydraulik mittels Osmose angewenden. Dies ist eine durch Ausdehnung verteilte Nachgiebigkeit. Dazu kommt ihre spezialisierte Fangmaske, welche durch verteilte Nachgiebigkeit das Biegen erlaubt. Beim Schlüpfen wird erneut mehrmals die Hydraulik angewenden. Die Libelle hat sich an die Gegebenheiten angepasst und nutzt die Hydraulik oft. Interessant ist auch, dass sich die Libellen oft an der Sonne platzieren, da sie so ihren Körper aufheizen.

 $^{^{175}\,\}rm http://www.waldzeit.ch/nachhaltigkeit/oekologie/insekten/libellen/libellen-elegante-flugkunstler-gefrassige-rauber/$

¹⁷⁶ http://www.biology-resources.com/insect-structure.html

¹⁷⁷ Urania Tierreich Insekten, K. Günthert, S.13

7.9 Deckelschlüpfer am Beispiel der Schmeissfliege

O Allgemeine Information: Die Fliegen sind als fliegende Lästlinge und Krankheitüberträger allgemein bekannt, verbringen jedoch die grösste Zeit ihres Lebens als Larve. Sie werden nach der Art ihrer Schlupftechnik in Spalt- und Deckelschlüpfer gegliedert. In diesem Abschnitt werden wir nur die Deckelschlüpfer (Cyclorrhapha, griech. ,cyclo-, = ringförmig und ,raphe' = Naht) genauer betrachten, welche zur höchstentwickelten Gruppe der Fliegen zählt.¹⁷⁸



Abb. 104: Deckenschlüpfer bei der Entpuppung

- o **Funktion**: *Entpuppung*: Analog der Libelle verbringt die Fliege ihren ersten Lebensabschnitt als Larve, umgangssprachlich als Made, bis diese genügend gross und entwickelt ist. Dann verpuppt sie sich und schlüpft als Fliege.
- O Aktuatorik: Hydraulik: Die Deckenschlüpfer sprengen mit der aufgeblähten Kopfblase, in die sie Hämolymphe pressen, den Deckel ihrer Tönnchenpuppe ab. Die Kopfblase wirkt als Hydraulikhebel. Diese entwickelt sich nach dem Schlüpfen wieder zurück. Danach helfen peristaltische Bewegungen aus ihrer Hülle. Es dauert einige Zeit bis die Fliege flugbereit ist, da die Strukturen noch erhärten müssen.^{179,180}
- o **Sensorik:** Die Lebensprozesse werden durch Hormone gesteuert. Weitere Faktoren, wie Temperatur und Feuchtigkeit müssen stimmen. ^{181,182} Zu weiteren Indikatoren konnte nichts gefunden werden.

¹⁷⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Deckelschlüpfer

¹⁷⁹ http://www.wildbienen.de/wbi-r400.htm

¹⁸⁰ http://www.wildbienen.de/wbi-p831.htm

¹⁸¹ http://insektoid.info/fliegen/

¹⁸² http://www.insektenbox.de/fibel/ent/

- O Bewegungsfreiheit -intervalle: Die Vermehrung ist vom Klima und dem Nahrungsangebot abhängig. Da Fliegen beinahe keine Brutpflege verrichten, wird eine Grosszahl an Eiern gelegt. Innerhalb von 8 48 Stunden sind die Larven in den Eiern schlüpfreif. Nach drei Häutungen sind sie reif und verpuppen sich. Nach einigen Tagen Puppenruhe sprengen sie den Deckel der Puppe ab und eine erwachsene Fliege schlüpft. Von der Eiablage, über das Larvenstadium, bis hin zum Schlüpfen beträgt die Entwicklungszeit etwa zwei bis drei Wochen. Dieses bewegliche System ist der verteilten Nachgiebigkeit durch Dehnung zuzuordnen.
- O **Zusammenhang Form Funktion Aktuatorik Sensorik:** Es ist erstaunlich, welche Lösungen die Natur gefunden hat, um Probleme zu lösen. Die Hydraulik ist ein sehr simpler Mechanismus, wie man bei den Deckelschlüpfern sehen kann. Diese Schlüpfvariante hat sich bewährt. Einerseits ist die Hydraulik in der Entpuppung wesentlich und andererseit bei der Aushärtung des Körpers.

¹⁸³ Urania Tierreich Insekten, K. Günthert, S.13

7.10 Schwarzer Kiefernprachtkäfer



Abb. 105: Schwarzer Kiefernprachtkäfer

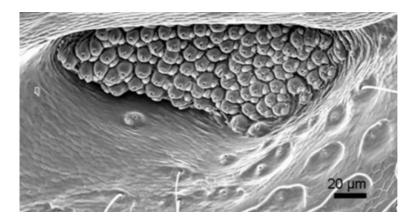


Abb. 106: Mechanorezeptoren zur Registrierung von IR-Strahlung

- Allgemeine Information: Der Schwarze Kiefernprachtkäfer (Melanophila acuminata) ist weit verbreitet und ist als feuerliebend bekannt. Dies weil die adulten Käfer auf Waldbrände angewiesen sind, da sie ihre Larven in verbrannte oder noch glimmende Bäume legen. Durch extrem empfindliche Infrarotsensorik können die schwarzen Kieferprachtskäfer Waldbrände ,hören'. 184
- o **Funktion:** *Infrarotmessung:* Um sich fortzupflanzen, brauchen sie Waldbrände, welche sie zuerst orten müssen. Dazu haben sie ein durch Hydraulik betriebenes Sensoriksystem, das Waldbrände durch Infrarotmessungen registriert.

¹⁸⁴ http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Kiefernprachtkäfer

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015

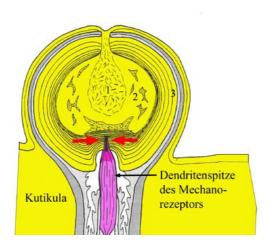


Abb. 107: Funktionsweise eines IR-Rezeptors

- o Aktuatorik: Hydraulik und Sensorik: In den Mechanorezeptoren, welche Druckschwankungen registrieren, werden Wärmereize zuerst in Druckerhöhung umgewandelt. Im Druckbehälter (Abb. 107, 1) befindet sich ganz wenig Wasser, das sich bei Infrarotbestrahlung und weiteren bestimmten Wellenlängen (3 µm Wellenlänge, also typisch für Waldbrände) und zusätzlich über die Cuticula (3) erwärmt. Es dehnt sich schlagartig aus und der Druck wird erhöht (2). Dadurch wird die Dendritenspitze des Mechanorezeptors (\rightarrow) verformt, was zur Ausschüttung von Ionen führt. Diese Spannungsänderung registriert der Käfer. Da das System hydraulisch funktioniert, nimmt der Käfer innert tausendstel Sekunden die Infrarotstrahlung wahr. In der Abb. 106 sind viele Mechanorezeptoren in der Vertiefung auf der Unterseite des Käfers zu sehen. In der Abb. 107 wird ein Mechanorezeptor im Querschnitt dargestellt. 185,186, 187
- O **Sensorik:** Die Käfer werden durch Rauch, wecher über die chemischen Sinnesrezeptoren geortet wird, über aktuelle Waldbrände informiert. Auch weit entfernte Brände können lokalisiert werden. Und wie oben bereits erläutert, können die Käfer durch hitzebedingte Volumenveränderung die Waldbrände orten.
- Bewegungsfreiheit -intervalle: Die Kiefernprachtskäfer gehen während der Eiablage in Waldbrandgebiete. Die Rezeptoren arbeiten mit der verteilten Nachgiebigkeit durch Ausdehnung von Wasser.
- Zusammenhang: Form Funktion Aktuatorik Sensorik: Diese IR-Sensorik ist einzigartig und war bis vor kurzem noch unerforscht. Der Käfer ist perfekt angepasst, so sind z.B. die IR-Sensoren unten am Körper angebracht, die Tiere können so im Flug Waldbrände orten. Es wurde bereits ein Patent für diesen mikrohydraulischen IR-Rezeptor von der Universität Bonn angemeldet. Bioniker wollen neue Brandmelder mit diesem IR-System entwickeln, erste Erfolge wurden bereits erzielt.¹⁸⁸

76

¹⁸⁵ http://www3.uni-bonn.de/Pressemitteilungen/kaefer-hoert-wenn-es-brennt

¹⁸⁶ http://www3.uni-bonn.de/Pressemitteilungen/133-2012

¹⁸⁷ http://www.bionik.uni-bonn.de/bionik-projekte/infrarotsensoren/funktionsweiseder-ir-rezeptoren

¹⁸⁸ http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-4597-2006-04-18.html

An dieser Stelle ist noch ein weiterer hydraulischer Mechanimus zu erwähnen, welcher mangels Informationen nicht weiter recherchiert werden konnte.



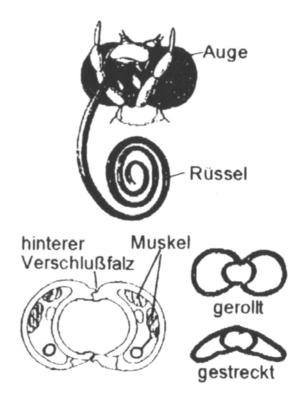


Abb. 108: Saugrüssel des Schmetterlings

Abb. 109: Schema des Saugrüssels

 Vermutet wird, dass Schmetterlinge den Saugrüssel mit einem hydraulischen Mechanismus ausrollen, wobei im Innern der Blutdruck erhöht wird, welcher die Muskeln anregt (Abb. 109). Dazu dürfte wieder die verteilte Nachgiebigkeit eine Rolle spielen.

8 Interpretation - Diskussion - Schlussfolgerung

In diesem Kapitel werden die erkannten hydraulischen Systeme der Versuche ausgewertet und interpretiert. Es wird nicht auf jedes einzelne untersuchte System eingegangen, mehr sollen allgemeine hydraulische Bewegungsprinzipien gefunden werden, welche später für die technische Anwendung interessant sind (s. *Kapitel 9 Anwendung*).

An verschiedenen Stellen dieses Kapitels wird die Leitfrage beantwortet. Ihre Vielschichtigkeit bedingt die Betrachtung aus verschiedenen Perspektiven und die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Aspekte.

In der *Diskussion 8.2* werden die Ergebnisse kritisch beurteilt und mit der *Schlussfolgerung 8.3* werden mögliche weitere Fragestellen resp. wird der Forschungsbedarf aufgezeigt.

8.1 Auswertung und Interpretation

Sowohl in der theoretischen Einleitung (s. Diagramme 1 und 2), wie in der praktischen Arbeit wurde verdeutlicht, wie verbreitet bei den Arthropoden das hydraulische System ist. Die meisten Gliederfüssler nutzen ihre eigene Körperflüssigkeit als hydraulisches Druckmittel. Dies erweist sich als vielseitig und multifunktional, was den unterschiedlichen Bedürfnissen entgegenkommt. Folgende Tierbeispiele verdeutlichen dies:

- Spinnen nutzen die Hämolymphe, um ihre filigranen Beine strecken und schnell bewegen zu können. Durch plötzliche Druckerhöhung können sie sogar herumspringen. Dieser Vorgang ist durch Muskelarbeit reversibel.
- Bei den Heimchen dient die Hämolymphe zur Bewegung ihrer langen Antennen, die mit vielen Sinnesorganen ausgestattet sind. Der hydraulische Druck kann dabei variiert werden.
- Die Libellen nutzen ihre Körperflüssigkeit sehr vielseitig. Einerseits erweist sie einen grossen Dienst beim Schlüpfen und Aushärten des neuen Exoskeletts und ihrer Flügel. Andererseits spielt die Hämolymphe bei extrem schnellen Bewegungen ihrer Fangmaske eine wichtige Rolle.
- Alle Deckelschlüpfer wie beispielsweise die Fliegen, aber auch Schmetterlinge, können nur dank hydraulischem Druck schlüpfen und analog den Libellen ihr vergrössertes Exoskelett und die neu entwickelten Flügel damit aushärten lassen. Schmetterlingen können zusätzlich ihren Saugrüssel durch hydraulischen Lymphdruck aus der gerollten Ruhephase ausstrecken, um an den versteckten Nektar zu gelangen.

Eine andere hydraulische Methode, um sich zu vergrössern ist osmotisch bedingt und kommt nur bei Tieren, die im Wasser leben vor.

- Die Garnele nutzt bei den mehrmaligen Häutungen während ihres Lebens die Osmose. Sie lässt Wasser in den Körper eindringen, um durch die Druckerhöhung sich zu vergrössern bis das neue Exoskelett ausgehärtet ist.
- Weil die Libelle einen grossen Teil ihres Lebens als Larve unter Wasser verbringt bedient auch sie sich der osmotischen Vergrösserung.

Die Eiablage stellt ganz besondere Anforderungen an das Abdomen verschiedener Arthropoden.

- Bei den Heuschreckenweibchen dient der körpereigene Schaum als Druckmittel, um das Abdomen möglichst lang zu strecken und so die Eier tief geschützt in den Boden zu legen. Nach der Eiablage geht das Abdomen in den Normalzustand zurück. Dieser reversible Prozess ist wichtig, damit das Weibchen sowohl möglichst viele Eier gleichzeitig entwickeln kann als auch sich wendig bewegen kann, wenn sie nicht trächtig ist.
- Das Abdomen der Termiten- und Ameisenköniginnen wird gedehnt, damit die Eier wie in einem Brutkasten heranreifen können.

Das Abdomen dient nicht nur für die Entwicklung von Eiern, sondern kann auch für die Speicherung von Nahrung genutzt werden.

- Extrem gut ausgeprägt ist dieses reversible hydraulische System bei den Honigtopfameisen. Im dehnbaren Abdomen wird die Zuckerflüssigkeit gelagert, um damit das hungrige Volk zu ernähren. Die Reversibilität ist besonders gut ersichtlich. Gehen sie auf Nahrungssuche sind sie klein und wendig, kommen sie mit prall voll gefülltem Abdomen zurück zum Volk können sie sich kaum mehr bewegen.
- In unseren Breitengraden weit bekanntere Beispiele für die Speicherung der Nahrung im Abdomen sind die Mücken und Zecken. Sie saugen sich bei ihrer Blutmahlzeit voll und ernähren sich noch lange davon.

Als Spezialfall kann man die Leistung des schwarzen Kiefernprachtkäfers bezeichnen. Mit seinen spezialisierten Infrarotrezeptoren kann er Waldbrände orten.

Abschliessend werden in diesem Kapitel die oben zusammengefassten Ergebnisse mit wesentlichen Themen weiterer Literaturrecherche verglichen.

Hämolymphe: In dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die Hämolymphe in hydraulischen Systemen für die Bewegungsabläufe verantwortliche ist. Des weitern übernimmt sie als meist farbloser Blutersatz folgende Aufgaben: Transport der Nährstoffe, Hormone und Stoffwechselprodukte, Temperaturausgleich und Wundverschluss. Da bei den Arthropoden ein offenes Blutsystem vorliegt, vermischen sich die Flüssigkeiten. Darum wird die Hämolymphe oft als Blut der Gliederfüssler bezeichnet. ^{189,190,191}

Hydroskelett: Der Fokus dieser Arbeit liegt bei den Hydroskeletten, bei welchen die Bewegung durch Hydraulik erzielt wird. Dieses wird als die älteste Skelettform bezeichnet.¹⁹² Erst später haben sich Muskelskelett-Systeme entwickelt, um den Körper zu bewegen.¹⁹³

Die Gliederfüssler nutzen dieses einfache und ursprüngliche System sehr vielfältig wie belegt wurde. Die Spinne hat an ihren Beingelenken zusätzlich einen Beugemuskel, welcher als Gegenspieler zur inneren Körperflüssigkeit arbeitet. Daraus resultieren effektive und energiersparende Laufbewegungen und Sprünge.¹⁹⁴

Speicherung elastischer Energie: Wie bei den Heuschrecken nachgewiesen, kann ihre Membran durch die Dehnung elastische Energie speichern. Der Aufbau und die Zusammensetzung dieser Membran spielen dabei eine entscheidene Rolle.

Als weiteres Beispiel kann die Spinne erwähnt werden, bei welcher das Gelenk durch Hydraulik überspannt wird. Nimmt der hydraulische Druck ab, schnellt das Gelenk zurück und das Bein wird angezogen. Elastische Strukturen sind klein und darum platzund energiesparend und trotzdem vielseitig und effizient. ¹⁹⁵

Negative Punkte der Hydraulik: Bei der Hydraulik wird vergleichsweise viel Flüssigkeit gebraucht und es wird viel Stoffwechselenergie benötigt, um die hydraulische Flüssigkeit unter Druck zu setzen. Deshalb ist das Zusammenwirken von Muskulatur, Stoffwechsel, Durchblutung und Skelett entscheidend. 196,197

 $leipzig. de/{\sim}m6bast/rvlevolution/121107 rvlEvolutionFrankfurterEvolutions theorie Gudo.pdf$

¹⁸⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Hemolymph

¹⁹⁰ http://vogelspinnenforum.ch/lexicon/index.php/Entry/199-Hämolymphe/

¹⁹¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Hämolymphe

¹⁹² Zoologie, von Rüdiger Wehner, Walter Jakob Gehring, S. 379-398

¹⁹³ http://wwwm.htwk-

¹⁹⁴ http://de.wikipedia.org/wiki/Hydroskelett

¹⁹⁵ http://www.biology-resources.com/insect-structure.html

¹⁹⁶ Tierphysiologie, von Christopher D. Moyes, Patricia M. Schulte, S. 621-622

¹⁹⁷ Biologie: Ein Lehrbuch, hrsg. von Gerhard Czihak, H. Langer, H. Ziegler, S. 473-485

8.2 Diskussion

Wie in der Einleitung betont, baut die Bionik auf der Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen. In dieser Maturarbeit wurde der Schwerpunkt auf biologische Betrachtungen gelegt, da diese von meiner Ausbildung abgedeckt sind. Aspekte der Abstraktion und der technischen Umsetzung konnten ansatzweise nur mit Dipl.-Ing. Gundula Schieber vom Technischen Institut der Universität Stuttgart diskutiert werden.

Bionik ist als Wissenschaft noch sehr jung und wenig verbreitet, so dass nur wenige Gesprächspartner vorhanden sind. Mit der zusätzlichen Spezialisierung auf das hydraulische System der Arthropoden konnte auch kaum Fachliteratur gefunden werden. Einzelne wesentliche Aspekte, welche die Leitfrage betreffen, mussten auf verschiedensten Wegen zusammengetragen werden. Diese erforderliche Recherche gestaltete sich extrem aufwändig. Die notwendigen Ergebnisse waren aber Bedingung für die praktischen Untersuchungen.

Aufgrund dieser Arbeit scheint es, dass Arthropoden noch wenig erforscht sind im Vergleich beispielsweise zu den Wirbeltieren. Dies musste ich erfahren, weil ich unzählige Male auch in der Fachliteratur keine Ansatzpunkte für meine Fragestellungen finden konnte. Sogar Fachgespräche mit dem Insektenspezialisten wie Prof. Dr. D. Burckhardt der Universität Basel zeigten mir die Grenzen meiner Arbeit auf.

Um in der Forschung über hydraulische Systeme von Arthropoden weiter zu kommen, müssten neue Wege eingeschlagen werden, welche in der *8.3 Schlussfolgerung* erwähnt werden.

Ein weiteres Problem bestand in der Beschaffung der Versuchstiere. Es konnten nur vier geeignete Arthropoden erworben und untersucht werden. Da weitere Tiere nicht zur Verfügung standen, konnte diese praktisch nicht weiter untersucht und nur mittels der spärlichen Literatur beschrieben werden.

Die Ergebnisse zur Steifigkeit der ISM und der Sklerite der Wüstenheuschrecke mit dem AFM müssen kritisch betrachtet werden. Da der Cantilever nur gerade 200 nm tief in die Proben eindringt, kann er auch nur die oberste Schicht messen. Die Proben sind aber viel dicker. Mangels weiterer Untersuchungen kann nicht abschliessend beurteilt werden, wieso die ISM steifer ist als das Sklerit. Vielleicht gibt es einen guten Grund, warum die oberste Schicht der ISM sehr hart ist. Für weitere Untersuchungen muss ein steiferer Cantilever verwendet werden, welcher tiefer in die Proben eindringen kann. Die geringe Rauheit der ISM und Sklerite ist wahrscheinlich wichtig, dass sich das Abdomen mit wenig Reibung bewegen kann.

Innerhalb dieser Maturarbeit einen Prototyp mit den erforschten hydraulischen Systemen zu erstellen, konnte aus den oben genannten Gründen nicht erreicht werden. Dieses Vorhaben sprengt den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit und verdeutlicht, die Notwendigkeit an Forschung und Entwicklung innerhalb der Bionik. Hier liegt also noch ein grosses Potential für die Zukunft.

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015

8.3 **Schlussfolgerung**

Vorliegende Maturarbeit beschäftigt sich wie in der Einleitung erwähnt mit einem interdisziplinären Thema, das nicht nur Forschungsarbeit braucht, sondern auch Impulse von der Anwenderseite. Bionische Umsetzungen profitieren von der Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen, welche aber auch aufwändig und kostspielig sein können.

Diese Arbeit zeigt auf, dass folgende Forschungen noch notwendig sind:

- Wie sieht die chemische Zusammensetzung der Sklerite und Membrane aus? Dazu ist eine chemische Stoffanalyse erforderlich. Hilfreich ist dabei die European Chitin Society, die Ansätze in der Chitin-Forschung koordiniert. 198 Die Eigenschaften und Leistungen der Cuticula konnten bis heute nicht annähernd erreicht werden. Darum sind weitere Forschungen nötig.
- Des weitern muss das hochelastische Material Resilin untersucht werden, um es künstlich herzustellen und der Technik zur Verfügung stellen zu können.
- Forschung an Verbundstoffen ist zentral, da sie analog des Exoskeletts verschiedenen Ansprüchen dienen und somit in der Technik vielseitig angewendet werden können.
- Röntgenaufnahmen von Tieren sind nützlich, um die Hydraulik zu orten. So wurde im PSI mit Synchotronaufnahmen das Innere eines fliegenden Insekts während des Fluges sichtbar gemacht. 199

Möglicherweise sind in der Materialwissenschaft und dem Ingenieurwesen die Vorteile der Bionik noch zu wenig bekannt, so dass der Bedarf von dieser Seite eher selten formuliert wird. Diese Impulse wären aber wiederum hilfreich, damit die NaturwissenschaftlerInnen möglichst problem- und lösungsorientierte Vorschläge unterbreiten können.

¹⁹⁸ http://www.euchis.org

82

¹⁹⁹ http://www.psi.ch/media/3-d-film-zeigt-das-innere-fliegender-insekten

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015

9 Anwendung

9.1 Architektur

Die Begriffe 'Bau-Bionik', 'Architektur-Bionik' oder 'Natürliche Konstruktionen' deuten auf eine bionische Umsetzung im architektonischen Bereich hin. Form, Struktur und Funktionalität der Natur werden bei der Planung und Umsetzung von Bauwerken immer häufiger berücksichtigt. Denn die bionischen Gegebenheiten sind gut an die Umweltbedigungen angepasst und decken die aktuellen Bedürfnisse punkto Nachhaltigkeit gut ab.²⁰⁰

Systeme zum Öffnen, Verstellen und Schließen sind heutzutage in der Architektur allgegenwärtig. Ihre Mechanik basiert zumeist auf der Kopplung starrer Bauteile durch Gelenke. Probleme dieser wandelbaren Strukturen sind dabei vor allem die hohe mechanische Komplexität und die damit verbundenen Kosten für Herstellung, Wartung und Instandhaltung. Bedingung für den Dauereinsatz solcher wandelbarer Konstruktionen ist immer ein erfolgreiches Zusammenspiel aller Komponenten. Ist ein Gelenk defekt, kommt das System zum Erliegen. Die mechanische Komplexität nimmt bei Gebäudeformen mit nicht-planarer Geometrie erheblich zu.

Bei den wirbellosen Tieren findet man eine Vielzahl von Bewegungsmechanismen, die sich an komplexe geometrische Situationen anpassen und dennoch ganz auf mechanische Komponenten verzichten. Dies wird erreicht, indem sie die Nachgiebigkeit ihrer Komponenten ausnutzen und mehrere Funktionen in einem Werkstoff integrieren. Diese multifunktional nachgiebigen Mechanismen unterliegen einer Reihe von Anforderungen wie Robustheit, energieeffiziente Kinematik und sparsamer Umgang mit Ressourcen. Die genau gleichen Kriterien sind auch für das umweltbewusste Bauen von zentraler Bedeutung.

Die Exoskelettstruktur der untersuchten Arthropoden besteht aus zwei verschiedenen Bestandteilen mit ungleichen Eigenschaften, dem harten Sklerit und der flexiblen Membran. Genau dieser Unterschied macht architektonische Konstruktionen mit Falten-, Schalen- und Membranstrukturen in Kombination der Hydraulik interessant.

Mobile Konstruktionen, welche analog dem Exoskelett weiche und feste Teile besitzen und z.B. bei Zelten verwendet werden, zeichnen sich durch leichte und schnelle Handhabung aus, welche für die Veränderung des Standorts essentiell sind. Notunterkünfte, Militär- und Festzelte, Ausstellungs- und Restaurantpavillon bieten Witterungsschutz vor Sonne und Regen. Sie sind billig, haben geringe Material- und Montagekosten, sind beweglich, gut transportierbar, anpassungsfähig, schnell und unkompliziert aufbaubar und bedienbar, demontierbar und wiederverwendbar und haben eine grosse Formvielfalt.

Wandelbare Dächer und Fassaden schützen ebenfalls vor Witterungseinflüssen. Da sich die Witterung laufend ändert, sind sie in der Architektur beliebt.

- Bauart (Membrankonstruktionen & steife Konstruktionen)
- Bewegungsart (Raffen, Rollen, Schieben, Drehen, Klappen)

²⁰⁰ Architektur und Bionik, J. S. Lebedew, S. 5-18

_

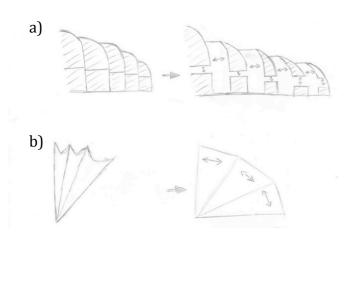
- Bewegungsrichtung (Parallel, Zentral, Zirkulär, Peripher)

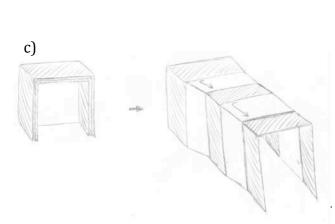
Einerseits können durch die Hydraulik grosse Kräfte übertragen und vielseitige Arbeiten ausgeübt werden, andererseits wird sie als Lärm- und Wärmedämmmaterial verwendet. So ist Wasser in stabilen Behältern ein zukunftsorientiertes Baumaterial.

Die Membranen sind biegbar, passen sich gut an und können elastisch sein. Sie nehmen nur Zugkräfte auf und üben keine Druckkräfte aus, deshalb müssen sie einen Gegenspieler haben. In Kombination von Hydraulik und Membranen ist dieser Mechanismus vielseitig verwendbar.

In der Architektur werden hydraulische Gelenke und Membrankonstruktionen teilweise schon angewandt. Doch ihr Potential ist noch lange nicht ausgeschöpft. Wichtig ist, dass die Beziehung von Form und Funktion abgestimmt ist, wie dies bei den Arthropoden der Fall ist. Die Anfälligkeit von technischen Strukturen kann vermindert werden, indem möglichst wenig unterschiedliche Materialien kombiniert werden. Mit der Multifunktionalität von Bauteilen, sowie der Selbstregeneration von Materialien könnten in der Architektur neue Konstruktionen entwickelt werden.

In den untenstehenden Skizzen liess ich mich von den untersuchten Arthropoden inspirieren. Links sind die Konstruktionen immer in normalem Zustand zu sehen und rechts sind die Konstruktionen in vergrössertem Zustand. Die schraffierten Flächen stellen harte Tragkonstruktionen dar. Die weissen Flächen stellen die Membranen dar, welche weich und teils elastisch sind. Alle Konstruktionen lassen sich den Umständen entsprechend vergrössern. Die Form folgt immer der Funktion.





- a) Die Idee für diese Konstruktion stammt vom Heuschreckenabdomen, welches sich sowohl in der Länge als auch in der Höhe und Breite verändern lässt. Die Membranen müssen nicht zwingend elastisch sein. Die Höhe der starren Bauteile kann auch gleich gross sein.
- b) Auch hier ist das Zusammenspiel von steifen Konstruktionen und den dazwischen liegenden elastischen Membranen interessant. Diese Konstruktion kann natürlich auch in Halbkreisform vorliegen. Die Rückstellkraft der Membranen lässt diese Konstruktion schnell und einfach versorgen.
- c) Das Prinzip dieses Mechanismus basiert auf der gleichen Idee wie bei a. Die Bauteile können untereinander geschoben werden und brauchen so wenig Platz. Beim Herausziehen

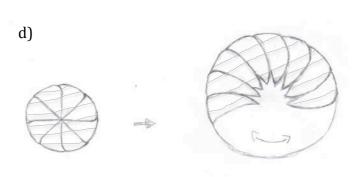


Abb. 110: Bionische Skizzen von Membrankonstruktionen

werden die Membranen sichtbar und vergrössern die Konstruktion.

d) Die segmentierten Ameisenpanzer standen als Vorbild für diese Konstruktion. Doch sollen die harten und schützenden Segmente oben bleiben und nicht wie bei den Ameisen verteilt werden. So könnten Wassertanks gebaut werden, die sich ihrem Wasservolumen anpassen und sich selbst schützen, was in heissen Ländern von Vorteil ist.

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015

9.2 Robotik

Wo es für die Menschen zu gefährlich wird oder ein Gebiet nur schwer zugänglich ist, können Roboter erste Erkundungen sowie Such- und Rettungsaktionen durchführen. So sollen Roboter beispielsweise nach einem Unglück zukünftig das Gefahrengebiet erkunden. Die Entwicklungen laufen auf Hochtouren. Damit dies möglich ist, müssen sie selbständig Hindernisse überwinden, Steigungen erklimmen und sich auf einem unstabilen Untergrund bewegen können. Traditionelle Mechanismen wie Raupen oder Räder kommen in solchen Fällen schnell an ihre Grenzen. Darum müssen neue Mechanismen untersucht und entwickelt werden. Voraussetzung ist, dass die Roboter leicht und wendig sind. Bewegungsmechanismen, welche durch die Hydraulik angetrieben werden, sind deshalb hoch interessant. Durch die Multifunktionalität können sie sich verschiedensten Bedingungen anpassen. Im Wasser könnte die Hydraulik gut genutzt werden und an Land die Pneumatik. Bei AKW-Unfällen wären hydraulisch betriebene Schwimmroboter sicherlich sehr interessant.

Herr Ijspeert, Leiter des Bioniklabors, und sein Team der ETH Lausanne untersuchen zur Zeit Bewegungsmöglichkeiten für eine neue Robotergeneration. Präzise Bewegungen könnten mit dem Prinzip der hydraulischen Spinnenbeingelenke ausgeführt werden. Mit IR-Sensoren ausgestattete Roboter können Informationen zu Bränden liefern. Falls die Roboter Proben nehmen müssen sind volumenveränderbare Bauteile sinnvoll.^{201,202}

In der Robotik ist das Zusammenwirken von hydraulischen Gelenken und Membrankonstruktionen bereits bekannt. Doch könnten durch die vertiefte Analyse von Arthropoden neue Erkenntnisse gewonnen und umgesetzt werden. Durch die meist sehr speziellen Anforderungen der Roboter ist die Anfälligkeit hoch und entsprechend gilt es, Aspekte der Multifunktionalität und Selbstregeneration zu berücksichtigen. Innovationen stehen auch bei der Energeiversorgung der Roboter noch an: so könnten durch die geschickte Nutzung der Hydraulik in Kombination mit erneuerbaren Energieformen neue Anwendungen geschaffen werden.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass es auch in der Robotik gilt, natürliche Vorbilder wie z.B. die Arthropoden für technisch ausgereifte Erfindungen zu nutzen. Dabei spielen u.a. die Veränderbarkeit des Volumens und die Beweglichkeit der Hülle mittels Hydraulik sowie multifunktionale Bauteile eine entscheidende Rolle.

 $^{^{201}} https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2011/november/hightech-spinne.html$

²⁰² http://www.leggedrobotics.ethz.ch/lib/exe/fetch.php?media=20min_wissen.pdf

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015

9.3 Weitere Anwendungen

Die gleichen Probleme, welche die Arthropoden zu bewältigen haben, stellen sich auch in der Technik. Es geht darum, eine ausgewogene Balance zwischen Schutz und Beweglichkeit resp. Schutz und Stabilität, zwischen Leichtigkeit und Effizienz, sowie von Verschleiss und Langlebigkeit zu finden.

Die Materialwissenschaft, die sich durch die Bionik inspirieren lässt, hat bereits Membranen entwickelt, die für grosse Belastungen geschaffen sind, und trotzdem über eine lange Nutzungdauer nicht kaputt gehen. Genau gleich wie bei den Heuschrecken. Um die Hydraulik in die Materialwissenschaft zu integrieren, müssen zusätzliche Anforderungen an Materialien beachtet werden.

Derzeit entstehen neue Impulse in der Materialwissenschaft, weil für das endliche Rohöl neue Materialien gefunden werden müssen. So gibt es inzwischen marktreife Biokunststoffe, welche nicht nur die herkömmlichen Produkte ersetzen, sondern für neue Anwendungen in der Umwelttechnik eingesetzt werden können.^{203,204} Auch das Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart ist an vorderster Front an diesen Entwicklungen beteiligt. Weiter wird an den Materialien Carbon und Glasfasern geforscht. Die Zukunft der Materialwissenschaft sind die Faserverbundwerkstoffe.



Abb. 111: Aus Shrilk hergestellter Bioplastik

Die Eigenschaften des Material Chitins selber konnten bis heute noch nicht nachgemacht werden. Eine interessante Erfindung ist dagegen Crabyon®, ein Verbundwerkstoff aus Chitin der Krabenschale und Cellulose. 205,206

Ein weiteres neues Material stellt Shrilk dar, das aus Chitin der Garnelenschalen und Proteinen der Seide besteht. Es wurde bionisch inspiriert aufgrund der Insektencuticula und ist flexibel, transparent und so stark wie Aluminium, aber halb so schwer.²⁰⁷

²⁰³http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFj AA&url=http%3A%2F%2Fwww.itke.uni-

stuttgart.de%2Fdownload.php%3Fid%3D596&ei=oAUoVZjIHJHqar2zgJgF&usg=AFQjCNHhWor-K2YGINpNXhfqSCZYexoYKA&bvm=bv.90491159,d.d2s

²⁰⁴ http://www.bio-

pro.de/biopolymere/artikelliste_biopolymere/index.html?lang=de&artikelid=/artikel/05156/index.html

²⁰⁵ http://www.crabyon.it/whatis.html

²⁰⁶ http://www.swicofil.com/products/055chitosan.html

²⁰⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Shrilk

Die technische Herstellung von einem Stoff mit den vielseitigen Eigenschafften von Chitin wäre sehr vorteilhaft. Das ITKE ist damit beschäftigt, eine steifigkeitsgradierte Faserverbundstruktur zu entwickeln. Mit Hilfe der Faserverbundtechnologie ist es heute möglich, ein Material mit lokal unterschiedlichen Steifigkeiten zu realisieren, wie dies bei den Arthropoden vorhanden ist. Dabei können unterschiedliche Harze, Fasern und die Verarbeitung der Fasern die Steifigkeit beeinflussen.

Flectofin® ist ein wandelbarer Sonnenschutz für Gebäude nach dem Vorbild der Pflanze *Strelitzia reginea*. Da das Material nur gefaltet wird, braucht sie keine



wartungsintensiven und verschleissanfällige Gelenke. 208, 209, 210 Auch die Arthropoden weisen eine grosse Vielfalt an Knick-, Faltund Biegetechniken auf. Der Mechanismus des volumenveränderbaren und beweglichen Abdomens durch spezielle Segmentierung kann der Ausgangspunkt für diverse technische Errungenschaften darstellen.

Abb. 112: Flecofin

Leichte Konstruktionen sind v.a. in der Raumfahrt von grossem Vorteil, darum kommen Falt-, Knick-, und Biegetechniken mit Membranen oft zum Einsatz. Die Kombination von



Abb. 113: Inflatables

Hydraulik und Pneumatik ist in weiteren Anwendungsgebieten sehr interessant. So haben zwei Mastserstudenten an der Universität Münster z.B. 'Inflatables', aufblasbare Luftkissen, als Grundbausteine entwickelt, die durch verschiedene Fixierungen zu Notunterkünften, Ausstellungspavillons oder einfach zu robusten Sitzmöbeln zusammengefügt werden können.²¹¹

88

²⁰⁸ http://www.simonschleicher.com/Flectofin_Bremen.pdf

²⁰⁹ http://www.str-ucture.com/was/forschungsprojekte/reference/bionische-fassadenverschattung-flectofin/

²¹⁰http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFj AB&url=http%3A%2F%2Fwww.itke.uni-

stuttgart.de%2Fdownload.php%3Fid%3D486&ei=ZwYoVab5M47gaJeMgZgO&usg=AFQjCNF34fr8vo68PNGzKlTLtKWCn9uYJQ&bvm=bv.90491159,d.d2s

²¹¹ https://hzhm.wordpress.com/tag/inflatable/

Auch für den praktischen Alltag werden immer mehr Gegenstände mit Falttechnik entwickelt. Die Vorteile von volumenveränderbaren Gegenständen sind offensichtlich.





Abb. 115: Volumenveränderbare Reisekoffer

Abb. 114: Volumenveränderbare Trinkflaschen mit Faltkonstruktion



Abb. 116: Faltkonstruktion im Tram

Eine weitere Faltkonstruktion ist in der nebenanstehenden Abbildung zu sehen, in welchem ein Gelenk eines Basler Trams zu sehen ist. Dieses Faltgelenk erlaubt es, dass die langen Trams mit ihren Waggons um die Kurve kommen.

10 Danksagung

Bedanken möchte ich mich als erstes bei meinem Betreuer, Herr Dr. C. von Weymarn. Er hat mich während der gesamten Arbeit unterstützt und mir Tipps gegeben.

Ein grosser Dank geht an Frau Dipl. -Ing. Gundula Schieber von der Universität Stuttgart, sie hat mich auf diese spannende Fragestellung gebracht und mir am Anfang in vielen Diskussionen gute Tipps und Ideen gegeben. Für Makrofotografie und die Mikroskop-Aufnahmen durfte ich auf die technische Unterstützung der Universität Stuttgart am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) zählen. Herzlicher Dank gilt auch Frau Isabell Schmauder, welche mir eine Einführung in die Technik der Makrofotografie und des Mikroskopierens gab.

Für die Lichtmikroskop- und Rasterelektronen-Aufnahmen bedanke ich mich herzlich bei Frau Evi Bieler und der Universität Basel. Die Atomic Force Microscope-Aufnahmen durfte ich mit Herrn PhD Philipp Oertle, ebenfalls von der Uni Basel durchführen.

Ein Dank geht auch an den Zoologischen Garten Basel, wo ich kostenlos europäische Wanderheuschrecken beziehen konnte.

Weiter bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freundinnen und Freunden für die Unterstützung und Motivation, welche sie mir gegeben haben. Sie haben mich nie im Stich gelassen und mir neuen Mut gegeben, auch wenn es manchmal schwierig war. Bei meiner Schwester Caroline bedanke ich mich für die Mithilfe auf der Suche nach Saftkuglern. Meinem Bruder Jean-Claude danke ich für die technische Hilfe am Computer.

Für das Korrekturlesen bedanke ich mich bei Herrn Dr. Francis Cordillot, Entomologe am bafu, und meiner Mutter Gabriela Graf, als Biologin.

Diese Maturarbeit hätte ohne die Hilfe all dieser Personen nicht in dieser Form entstehen können.

Danke, dass ich immer auf euch zählen konnte.

Marie-Claire Graf

Das Thema der Maturarbeit hat mir eine neue Sichtweise auf die Natur eröffnet. So habe ich in den Ferien auf Sizilien auf einer Wanderung im Naturschutzgebiet Zingaro auf etwa 300 m.ü.M in sandigem Untergrund einen Käfer mit extrem grossem Abdomen gefunden. Es handelt sich um einen mediterranen Ölkäfer der Familie Meloidea und der Gattung Meloe. Leider bleibt mir keine Zeit diesen Käfer genauer zu untersuchen. Ein interessanter Aspekt ist, dass der Käfer aus seinen Gelenken giftige Hämolymphe zur Abschreckung ausstossen kann, sogenanntes Reflexblut von Cantharidin. Also eine weitere Aufgabe der Hämolymphe.

Ich denke, dass ich mit dieser Arbeit ein neues Kapitel in meinem Leben gefunden habe, und dass diese Fragestellungen mich noch weiter beschäftigen und faszinieren werden.





Abb. 117: Mediteraner Ölkäfer auf Sizilien

Abb. 118: Mediteraner Ölkäfer auf Sizilien

11 Quellenverzeichnis

11.1 Literaturverzeichnis

ALDERSEY-WILLIAMS, HUGH (2003): zoomorphic. new animal architecture, Laurebce King Publishing, o.O.

BLICKHAN, REINHARD/ SERGEY PETKUN/ TOM WEIHMANN/ MICHAEL KARNER (2005): Autonomes Laufen, schnelle Bewegungen bei Arthropoden: Strategien und Mechanismen, Springer, Berlin/Heidelberg

BOSCH GROUP REXROTH (2013): Hydraulik – Grundlagen. Wissen kompakt, Bosch Rexroth AG, Drive & Control Academy, Würzburg

BURKHARDT, BERTHOLD (1984): Diatomeen I. Schalen in der Natur und Technik, Karl Krämer Verlag, Stuttgart (Institut für leichte Flächentragwerke IL28, Universität Stuttgart)

CHINERY, MICHAEL (1973): Insekten Mitteleuropas. Ein Taschenbuch für Zoologen und Naturfreunde, aus dem Englischen übersetzt und bearbeitet von Dr. Irmgard Jung und Dr. Dieter Jung, Paul Parey Verlag, Hamburg/Berlin

DÖNGES, JOHANNES (1988): Parasitologie, 2. Auflage, Thieme, Stuttgart/ New York

ENGEL, FRITZ MARTIN (1966): Das grosse Buch der Insekten. Eine Insektenkunde, Keyser-Verlag, München

ENNOS, A. ROLAND (2012): Solid Biomechanics, Princeton University Press, o.O.

FREI, OTTO (1995): Pneu und Knochen, Karl Krämer Verlag, Stuttgart (Institut für leichte Flächentragwerke IL35, Universität Stuttgart)

FÜLLER, HORST (1994): Urania-Tierreich/ Wirbellose 2, Urania-Verlag Leipzig, Jena/Berlin

GEILER; H (1979): Taschenbuch der Zoologie Bd. Allg. Zoologie, VEB Gustav Fischer Verlag, o.O

GREGUSS (1988): Patente der Natur, Quelle & Meyer Verlag, o.O

GRUBER, PETRA (2011): Biomimetics in Architecture. architecture of life and buildings, Springer Verlag, Wien/ New York

GRUNER; HANS-ECKHARD (1993): Urania-Tierreich/Wirbellose 1, Urania-Verlag Leipzig, Jena/Berlin

GULLAN P. J./ CRANSTON P. S. (2000): The Insects. An Outline of Entomology, 2. Auflage, Blackwell Science, o.O.

GÜNTHER, KURT (1994): Urania-Tierreich/ Insekten, Urania-Verlag Leipzig, Jena/ Berlin

HERTEL, HEINRICH (1963): Struktur Form Bewegung. Biologie und Technik, Krauskopf-Verlag, Mainz*

HILL, BERND Prof. Dr. phil. habil. (1999): Naturorientierte Lösungsfindung. Entwickeln und Konstruieren nach biologischen Vorbildern, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim

HONOMICHL, KLAUS/ BELLMANN HEIKO (1996): Biologie und Ökologie der Insekten, Fischer Verlag, Stuttgart

HONOMICHL, KLAUS (2003): Insekten. Die heimlichen Herrscher der Welt, C. H. Beck Wissen, München

JACOBS, WERNER/ RENNER, MAXIMILIAN (1988): Biologie und Ökologie der Insekten, Fischer Verlag, Stuttgart/ New York

JODIDIO, PHILLIP (2006): Architecture: Nature, Prestel Verlag, Munich, Berlin, London, New York

KIRCHNER, WALTER (2007): Die Ameisen. Biologie und Verhalten, 2. Auflage, Verlag C.H. Beck Wissen, München

KNIPPERS, JAN/ CREMERS JAN/ GABLER MARKUS/ LIENHARD JULIAN (2010): Atlas Kunstoffe + Membranen, Edition Detail, München

LEBEDEW, J. S. (1983): Architektur und Bionik, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin

NACHTIGALL, WERNER(2003): Bau-Bionik. Natur – Analogien – Technik, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Hongkong London/Mailand/Paris/Tokio

NACHTIGALL, WERNER/ BLÜCHEL, KURT G. (2000): Das grosse Buch der Bionik. Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart/München

NACHTIGALL, WERNER (2002): Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg

NACHTIGALL, WERNER (2008): Bionik. Lernen von der Natur, C. H. Beck Wissen, München

NACHTIGALL, WERNER/ WISSER, ALFRED (2013): Bionik in Beispielen. 250 illustrierte Ansätze, Springer Spektrum Verlag, Berlin/ Heidelberg

NAPPO, DONATO/ VAIRELLI STEFANIA (2010): Homes on the Move. Mobile Architecture, Tandem Verlag/ H. Fullmann

NEVILLE, ANTHONY C. DR. (1975): Biology of the Arthropod Cuticle, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York

PRPIC, NIKOLA-MICHAEL (2004): Vergleichende Studien zur Gliedmassenentwicklung bei Arthropoden, Dissertation, Köln

PACLT, J. DR. (1956): Biologie der primär fluglosen Insekten, Gustav Fischer Verlag, o.O.

RESH, VINCENT H., /CARDÉ, RING T. (2009): Encyclopedia of Insects, 2nd Edition, Academic Press, London

SCHOPPMEIER, MICHAEL (2003): Untersuchung zu funktionell konservierten sowie divergenten Mechanismen des Segmentierungsprozesses der Arthropoden am Beispiel der Spinne *Cupiennius salei*. Dissertation, Köln

SCHUMACHER, MICHAEL/ SCHAEFFER, OLIVER/ VOGT, MICHAEL-MARKUS (2010): move. Architektur in Bewegung – Dynamische Komponenten und Bauteile, Birkhäuser Verlag AG, Basel/ Boston/ Berlin

TOPHAM, SEAN (2001): Move Houses, Prestel, Munich/Berlin/London/New York

VAN DER REE, PIETER (2001): Organische Architektur, Verlag Freies Geisesleben, Amsterdam/ Stuttgart

WEBER, HERMANN/ WEIDNER, HERBERT(1974): Grundriss der Insektenkunde, 5. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart

ZAHRADNIK, JIRI/ SEVERA, FRANTISEK (1989): Der Kosmos Insektenführer, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart

ZENTNER, LENA Prof. (2014): Nachgiebige Mechanismen, DE Gruyter, Oldenbourg

^{*} Eines der ausführlichsten Bücher über Struktur, Form, Bewegung von der Biologie in die Technik umgesetzt und dies im Jahre 1963! Nur schade, dass der hydraulische Mechanismus nicht beschrieben und getestet wurde.

11.2 Internetverzeichnis

Universitäten:

Basel: http://www.biozentrum.unibas.ch/de/forschung/gruppen-plattformen/group/unit/lim/ (07.03.2015)

Basel: https://zmb.unibas.ch/mitarbeitende/ (07.03.2015)

Basel: https://zmb.unibas.ch/remtemlm/wissenswertes-ueber-das-raster-elektronenmikroskop/ (07.03.2015)

Bonn: http://www.bionik.uni-bonn.de/bionik-projekte/infrarotsensoren/funktionsweise-der-ir-rezeptoren (16.10.2014)

Bonn: http://www3.uni-bonn.de/Pressemitteilungen/133-2012 (16.10.2014)

Bonn: http://www3.uni-bonn.de/Pressemitteilungen/kaefer-hoert-wenn-es-brennt (16.10.2014)

Bremen/Stuttgart/Freiburg: http://www.simonschleicher.com/Flectofin_Bremen.pdf

Freiburg: http://www.bionik-online.de/wp-content/uploads/2012/05/Lotus_01_Info1.pdf (Plant Biomechanics group Freiburg) (13.10.2014)

Jena: http://www.uni-jena.de/-p-287633.html (14.10.2014)

Leipzig: http://wwwm.htwk-

 $leipzig.de/\sim m6bast/rvlevolution/121107rvlEvolutionFrankfurterEvolutions theorie Gudo.pdf \ (16.10.2014)$

Mainz:http://www.museunacional.ufrj.br/mndi/Aracnologia/pdfliteratura/Martens/Martens%201986 %20Grossgliederung.pdf (14.10.2014)

Oldenburg: http://blog.alumni.uni-oldenburg.de/?p=1107 (14.10.2014)

Saarland: http://www.uni-saarland.de/fak8/bi13wn/projekte/biomechanik/projects/dillinger.htm (13.10.2014)

Stuttgart: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2008/3614/pdf/080728_Disse2_A5.pdf (IBK2) (17.10.2014)

Stuttgart: http://www.bio-

pro.de/biopolymere/artikelliste_biopolymere/index.html?lang=de&artikelid=/artikel/05156/index.htm l (16.10.2014)

Stuttgart:

stuttgart.de%2Fdownload.php%3Fid%3D596&ei=oAUoVZjIHJHqar2zgJgF&usg=AFQjCNHhWor-K2YGINpNXhfqSCZYexoYKA&bvm=bv.90491159.d.d2s (17.10.2014)

Stuttgart: http://www.str-ucture.com/was/forschungsprojekte/reference/bionische-

 $\label{lem:condition} fassaden verschattung-flectofin/~(16.10.2014) \\ \textbf{Stuttgart:} \text{http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.itke.uni-} \\ \text{Stuttgart:} \text{http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.itke.uni-} \\ \text{Stuttgart:} \text{http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.itke.uni-} \\ \text{Stuttgart:} \text{http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.itke.uni-} \\ \text{Stuttgart:} \text{http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.itke.uni-} \\ \text{Heave the start of the start$

stuttgart.de%2Fdownload.php%3Fid%3D486&ei=ZwYoVab5M47gaJeMgZgO&usg=AFQjCNF34fr8vo68PNGzKlTLtKWCn9uYJQ&bvm=bv.90491159,d.d2s (16.10.2014)

Zürich ETH/ Lausanne EPFL:

http://www.leggedrobotics.ethz.ch/lib/exe/fetch.php?media=20min_wissen.pdf (24.10.2014)

Forschungsgruppen:

http://www.crabyon.it/crabyon.html (15.10.2014)

http://www.euchis.org (European Chitin Society) (13.10.2014)

http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4071997/ (National Center for Biotechnology Information) (16.10.2014)

http://www.psi.ch/media/3-d-film-zeigt-das-innere-fliegender-insekten (PSI) (13.10.2014)

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040816682900349 (Elsevier, Autor: Christian Bordereau) (17.10.2014)

http://www.senckenberg.de/root/index.php?page_id=1217 (Senckenberg World of Bioversity) (14.10.2014)

https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2011/november/hightech-spinne.html (Frauenhofer) (13.10.2014)

Wikipedia:

http://de.wikipedia.org/wiki/Ameisen (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Ameisen#Typbestimmende_Faktoren (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Bert_Hölldobler (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Bionik (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Chitin (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Cuticula (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Deckelschlüpfer (17.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Europäische Wanderheuschrecke (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Fühler (Biologie) (16.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Garnele (16.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Gliederfüßer (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Grätzel-Zelle (17.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Hämolymphe (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Honigtopfameisen (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulik (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Hydroskelett (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Integument_(Zoologie) (17.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Johnstonsches_Organ (16.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Juvenilhormon (16.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Kodex_über_den_Vogelflug (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Krebstiere (16.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Libellen (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Libellen (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_bionic_car (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Oothek (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Parasitismus(14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Raupe_(Schmetterling) (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Resilin (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Kiefernprachtkäfer (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Spinne (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Termiten (15.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Termiten#Geschlechtstiere (15.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Termiten#Lebenszyklus.2C_Differenzierung_von_Kasten (15.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Verbindungstechnik (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Werner Nachtigall (13.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Wüstenheuschrecke (14.10.2014) http://de.wikipedia.org/wiki/Zecken (14.10.2014) http://de.www.wikidepia.org/wiki/Artenvielfalt (12.10.2014) http://en.wikipedia.org/wiki/Hemolymph (17.10.2014) http://en.wikipedia.org/wiki/Shrilk (14.10.2014)

YouTube:

https://www.youtube.com/watch?v=5lgqRYJ_bgo (14.10.2014) https://www.youtube.com/watch?v=GojpKo7XLiY&list=PL2017A89796441B37 (13.10.2014) https://www.youtube.com/watch?v=GojpKo7XLiY&list=PL2017A89796441B37&index=3 (17.10.2014) https://www.youtube.com/watch?v=NoMBSm8KkjI (17.10.2014) https://www.youtube.com/watch?v=taJRllwe6nk (14.10.2014) https://www.youtube.com/watch?v=xYh5Csdf7lo (15.10.2014) https://www.youtube.com/watch?v=zlqpU9a7QPE (15.10.2014)

Firmen:

http://www.crabyon.it/whatis.html (14.10.2014) 0.html (13.10.2014) http://www.lotusan.de/de/home/home.html (15.10.2014) http://www.velcro.de (15.10.2014) http://www.velcro.de/index.php?id=14 (15.10.2014)

Internationales Bionikzentrum:

http://www.bionikzentrum.de/default.asp?navA=newsdetail&main=news&newsid=210 (14.10.2014) http://www.bionikzentrum.de/page_druck.asp?navA=bionik&navB=geschichte&navID=3&editable=1 (14.10.2014)

Weitere:

http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/528076(© Academic) (16.10.2014)

http://de.wikibooks.org/wiki/Haltung_von_Süßwassergarnelen:_Häutung (16.10.2014)

http://insektoid.info/fliegen/ (15.10.2014)

http://netportal.de/tiere/die-zucht-von-wanderheuschrecken/ (14.10.2014)

http://skeletalphylum.weebly.com/arthropoda.html (17.10.2014)

http://vogelspinnenforum.ch/lexicon/index.php/Entry/199-Hämolymphe/ (14.10.2014)

http://what-when-how.com/insects/anopheles-mosquito-insects/ (14.10.2014)

http://www.actias.de/19826-schmetterlinge-züchten-in-der-schule.html (13.10.2014)

http://www.bilder-der-natur.de/show.shtml (Autor: Werner Voigt) (13.10.2014)

http://www.biology-resources.com/insect-structure.html (Autor: D G Mackean) (14.10.2014)

http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2743522/Spectacular-images-reveal-locust-s-

reproductive-organ-grows-TWICE-body-length-lay-100-eggs-deep-soil.html (Dailymail UK Online) (14.10.2014)

http://www.focus.de/digital/computer/chip-exklusiv/tid-10233/bionik-von-haifischhaut-inspiriertes-hightech_aid_306681.html (Universität Nottinham) (15.10.2014)

http://www.insektenbox.de/fibel/ent/ (15.10.2014)

http://www.libellenwissen.de/wissen/dokumentation/libellenschlupf-metamorphose (Autor: Andreas Thomas Hein) (14.10.2014)

http://www.mhs.ox.ac.uk/staff/saj/thesis/baker.htm (Museum of the History of Science, University of Oxford) (17.10.2014)

http://www.museunacional.ufrj.br/mndi/Aracnologia/pdfliteratura/Martens/Martens%201986%20Gr ossgliederung.pdf (Autor: Joachen Martens) (16.10.2014)

http://www.naturfotos-naeher-hingeschaut.de/kat5-3-springspinnen.php (14.10.2014)

http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-4597-2006-04-18.html (Universität Bonn) (15.10.2014)

http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/begattungsorgane/7775&_druck=1 (13.10.2014)

http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/gruene-hydraulik-forscher-entwickeln-bewegungslehre-

fuer-pflanzen-a-357985.html (UniversitätCambridge/Harvard) (14.10.2014)

http://www.swicofil.com/products/055chitosan.html (15.10.2014)

http://www.waldzeit.ch/nachhaltigkeit/oekologie/insekten/libellen/libellen-elegante-flugkunstlergefrassige-rauber/ (Autor: Jakob Forster) (14.10.2014)

http://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article8097314/Macht-Geheimnis-der-Termitenkoenigingelueftet.html (Universität Osnabrück) (17.10.2014)

http://www.weltderphysik.de/detektor/physik-pur/die-graetzelzelle-eine-solarzelle-fuer-die-zukunft/ (Autor: Felix Läderach) (16.10.2014)

http://www.wildbienen.de/wbi-p831.htm (15.10.2014)

http://www.wildbienen.de/wbi-r400.htm (15.10.2014)

http://www.wissen.de/lexikon/termiten (14.10.2014)

http://www.wissenschaft.de/leben-umwelt/biologie/-/journal_content/56/12054/3709015/Das-

Geheimnis-der-Spinnenklauen/ (17.10.2014)

https://hzhm.wordpress.com/tag/inflatable/ (13.10.2014)

11.3 Abbildungsverzeichnis

	. 1: http://www.laricercadigianni.com/2012/11/leonardo-e-il-codice-sul-volo-degli.html	
	. 2: http://www.xpedeo.de/Mit_Leo_Luftikus_und_Lea_Lexika_durchs_Aeronauticum.html	
	. 3: http://www.schwarzwald-tourismus.info/service/anreise/Mit-dem-Flugzeug-anreisen	
	. 4: HTTP://WWW.WILDFIND.COM/PFLANZEN/SCHEIBENSCHNECKENKLEE	
	. 5: HTTP://www.bionik-vitrine.de/leonardo-da-vinci.html	
	. 6: HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HELISWISS	
	. 7: HTTPS://PREZI.COM/YPABLE6SLGBN/BIONIK/	
	. 8: HTTP://www.bionik-online.de/bottom-up-prozess/	
	. 9: HTTP://www.pressedienst.bremen.de/sixcms/detail.php?gsid=bremen183.c.2575.de	
	. 10: http://www.svb.de/de/vosschemie-unterwasserbeschichtung-haifischhaut.html	
	. 11: http://www.bg.uzh.ch/fundgrube/pflanzenvonnah/lotuseffekt/taro.html	
	. 12: http://www.maler-heyse.de/news/praxis/lotusan-fassadenfarbe.html	
	. 13: http://www.wis-potsdam.de/de/experimente-aus-wissenschaft/nachgebaut-lotuseffekt	
	. 14: HTTP://BLOG.ALUMNI.UNI-OLDENBURG.DE/?P=1107	
ABB	. 15: https://sites.psu.edu/abcdesigns/2014/04/11/velcro-most-prominent-example-of-nature-in	
_	SCIENCE/	
	. 16: http://www.cosmiq.de/qa/show/1878418/Mohnblume/	
	. 17: HTTP://www.yatego.com/q,salzstreuer,edelstahl	
ABB	. 18: http://www.fairkehrmagazin.de/fileadmin/user_upload/fairkehr/archiv/2005/fair_0405/	
	MAGAZIN/FISCH_AUTO.HTM	
	. 19: http://www.autobild.de/bilder/mercedes-benz-bionic-car-23773.html#bild2	
	. 20: http://woman.brigitte.de/leben-lieben/beruf-gesellschaft/baumarten-1065248/	
ABB	. 21: http://www.baublatt.ch/aktuelles/news/epfl-kongresszentrum-wo-die-photovoltaik-bunt-	
_	WIRD	
	. 22: http://internetfenster.beepworld.de/tiersystematik.htm	
	. 23: http://staff-www.uni-marburg.de/~schachtj/BC_Web/Grundbauplan.htm	
	. 24: https://www.studyblue.com/notes/note/n/terms-insect-biology-exam-1/deck/3789424	
	. 25: HTTP://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/cuticula/2745	
	. 26: HTTP://www.skorpione.de/forum/viewtopic.php?t=16863	
	. 27: THE INSECTS – AN OUTLINE OF ENTOMOLOGY, P. J. GULLAN/ P. S. CRANSTON, S. 18	
	. 28: Grundriss der Insektenkunde, H. Weber/ H. Weidner, S. 50	
	. 29: HTTP://www.mikroskopie-forum.de/index.php?topic=13358.0	
	. 30: http://de.wikipedia.org/wiki/Chitin	
	. 31: GRUNDRISS DER INSEKTENKUNDE, H. WEBER/ H. WEIDNER, S. 13	
	. 32: HTTP://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/arthropoda/927	
	. 33: THE INSECTS – AN OUTLINE OF ENTOMOLOGY, P. J. GULLAN/ P. S. CRANSTON, S. 22	
	. 34: Insekten – Die Heimlichen Herrscher der Welt, K. Honomichl, S. 69	
	. 35: THE INSECTS – AN OUTLINE OF ENTOMOLOGY, P. J. GULLAN/ P. S. CRANSTON, S. 86	
	. 36: http://www.libellen.tv/Libellen-Blog/	
ABB	. 37: http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2743522/Spectacular-images-reveal-locus	
	S-REPRODUCTIVE-ORGAN-GROWS-TWICE-BODY-LENGTH-LAY-100-EGGS-DEEP-SOIL.HTML	
ABB	. 38: http://www.news.ch/Dengue+Fieber+grassiert+in+Suedchina/639032/detail.htm	29
	. 39: http://www.mtb-news.de/forum/archive/index.php?t-625691.html	
	. 40: http://de.wikipedia.org/wiki/Honigtopfameisen-Wandgemälde	
	. 41: http://www.harunyahya.de/de/Bucher/4639/gottes-schopfung-in-der-natur/chapter/8734	
	. 42: http://de.wikipedia.org/wiki/Schmetterlinge	30
ABB	. 43: http://www.rp-online.de/leben/gesundheit/news/das-sind-die-haeufigsten-spinnen-in-	
	DEUTSCHLAND-BID-1.3684758	
ABB	. 44 HTTP://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2743522/Spectacular-images-reveal-locus	
A -	REPRODUCTIVE-ORGAN-GROWS-TWICE-BODY-LENGTH-LAY-100-EGGS-DEEP-SOIL.HTML	
	. 45: Gundula Schieber	
	. 46: HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/HYDRAULIK	
	. 47: HTTP://WWW.BRINKMANN-DU.DE/PHYSIK/SEK1/PH07_30.HTM	
	. 48: Eigenes Bildmaterial	
	. 49: http://allphotolenses.com/lenses/item/c_146.html	
	. 50: http://www.bresser.de/Mikroskopie/BRESSER-LCD-Mikroskop-8-9cm-3-5.html	
ABB	. 51: https://zmb.unibas.ch/geraete/lichtmikroskope/	40

ABB. 52: HTTPS://ZMB.UNIBAS.CH/GERAETE/FEI-NOVA-NANO-SEM-230/	
ABB. 53: HTTP://WWW.SEILNACHT.COM/NANO/NANO_MIK.HTML	41
ABB. 54: HTTPS://ZMB.UNIBAS.CH/GERAETE/GERAETE-ZUR-PROBENVORBEREITUNG/	41
ABB. 55: HTTPS://NSENSOREN.WORDPRESS.COM/HINTERGRUND/PRODUKTION-2/EBESPUTTERN/	
ABB. 56: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 57: EIGENES BILDMATERIAL	42
ABB. 58: EIGENES BILDMATERIAL	43
ABB. 59: EIGENES BILDMATERIAL	43
ABB. 60: EIGENES BILDMATERIAL	43
ABB. 61: EIGENES BILDMATERIAL	44
ABB. 62: HTTPS://WWW.MTHOLYOKE.EDU/~MENUNEZ/RESEARCHPAGE/AFM.HTML	44
ABB. 63: EIGENES BILDMATERIAL	46
ABB. 64: EIGENES BILDMATERIAL	46
ABB. 65: http://www.crissionline.de/fotogalerie/displayimage.php?album=22&pid=345#top_display_media/	46
ABB. 66: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 67: EIGENES BILDMATERIAL	48
ABB. 68: EIGENES BILDMATERIAL	48
ABB. 69: EIGENES BILDMATERIAL	50
ABB. 70: EIGENES BILDMATERIAL	52
ABB. 71: EIGENES BILDMATERIAL	52
ABB. 72: EIGENES BILDMATERIAL	53
ABB. 73: EIGENES BILDMATERIAL	53
ABB. 74: EIGENES BILDMATERIAL	54
ABB. 75: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 76: EIGENES BILDMATERIAL	55
ABB. 77: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 78: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 79: EIGENES BILDMATERIAL	56
ABB. 80: EIGENES BILDMATERIAL	
$Abb.81: \verb HTTP://www.museunacional.ufrj.br/mndi/Aracnologia/pdfliteratura/Martens/M$	
201986%20Grossgliederung.pdf	
ABB. 82: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 83: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 84: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 85: EIGENES BILDMATERIAL	
ABB. 86: HTTP://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4071997/	
ABB. 87: HTTP://WWW.NCBI.NLM.NIH.GOV/PMC/ARTICLES/PMC4071997/	
ABB. 88: HTTPS://NEUROPHILOSOPHY.WORDPRESS.COM/2007/02/21/FEELING-THE-VIBES-OF-THE-WAGGLE-DANCE/.	
ABB. 89: HTTP://ANTCLUB.ORG/NODE/6758	
ABB. 90: HTTP://EU.BATTLE.NET/SC2/DE/FORUM/TOPIC/286880495	
ABB. 91: THE INSECTS AN OUTLINE OF ENTOMOLOGIY, SECOND EDITION, S. 19	66
ABB. 92: http://www.t-online.de/lifestyle/gesundheit/id_64406360/stechmuecken-bringen-	
GEFAEHRLICHEN-HUNDEHAUTWURM-NACH-DEUTSCHLAND.HTML	68
ABB. 93: HTTP://WWW.BOOTE-FORUM.DE/SHOWTHREAD.PHP?T=86932&PAGE=11	68
ABB. 94: HTTP://FOTOS.UEBL.AT/MAIN.PHP?G2_ITEMID=547	
$Abb.\ 95: \verb HTTP://www.welt.de/wirtschaft/article 12645316/Flugpassagierin-mit-Bettwanzen-Bluten-B$	
BESUDELT.HTML	
$A \verb BB.96: \verb HTTP://www.viralfact.com/16-scary-and-amazing-images-from-under-the-microscope/$	
ABB. 97: HTTP://WWW.MTB-NEWS.DE/FORUM/ARCHIVE/INDEX.PHP?T-625691.HTML	
ABB. 98: http://www.harunyahya.de/de/Bucher/4639/gottes-schopfung-in-der-natur/chapter/87	
ABB. 99: HTTP://WWW.INSEKTENBOX.DE/FIBEL/HEM/TERMIT.HTM	69
ABB. 100: http://www.spiegel.de/fotostrecke/ameisenforschung-wir-nennen-es-superorganismus-	
FOTOSTRECKE-51453-3.HTML	
ABB. 101: DIE AMEISEN, WALTER KIRCHNER, S. 21, NACH SCHNEIRLA AUS DUMPERT 1994	
ABB. 102: http://www.natur-portrait.de/foto-48125-ein-kleines-wunder.html	
ABB. 103: HTTP://www.waldzeit.ch/nachhaltigkeit/oekologie/insekten/libellen/libellen-elegant	
FLUGKUNSTLER-GEFRASSIGE-RAUBER/	
ABB. 104: HTTP://www.angelplatz.at/phpBB3/angellexikon/m/maden_fliegenlarven.php	
ABB. 105: http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Kiefernprachtkäfer	
ABB. 106: http://www.technikjournal.de/cms/front_content.php?idcatart=1351idcat=59	75

ABB. 107: HTTP://www.bionik.uni-bonn.de/bionik-projekte/infrarotsensoren/funktionsweise-der-ir-	
REZEPTOREN	76
ABB. 108: HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SAUGRÜSSEL_(SCHMETTERLING)	77
ABB. 109: HTTP://www.bionik-wiki.de/wiki/index.php?title=Bild:Schmetterling_rüssel.jpeg	77
ABB. 110: EIGENES BILDMATERIAL	85
ABB. 111: HTTP://NEWS.HARVARD.EDU/GAZETTE/STORY/2014/05/PROMISING-SOLUTION-TO-PLASTIC-POLLUTION	187
ABB. 112: HTTP://www.str-ucture.com/was/forschungsprojekte/reference/bionische-	
FASSADENVERSCHATTUNG-FLECTOFIN/	88
ABB. 113: HTTPS://HZHM.WORDPRESS.COM/TAG/INFLATABLE/	88
ABB. 114: HTTP://www.logopremiums.com/mug-water-bottle-accordion-4071PM.jpg	
ABB. 115: HTTP://www.fuguluggage.com	89
Abb. 116: Eigenes Bildmaterial	89
Abb. 117: Eigenes Bildmaterial	91
Abb. 118: Eigenes Bildmaterial	91

Marie-Claire Graf Maturarbeit - Bionik 2015

Anhang

Diese Liste beinhaltet Arthopodenarten, bei welchen hydraulische Systeme recherchiert/ entdeckt/ vermutet werden. Anhand dieser Liste wurden die Tiere für den praktischen Teil der Arbeit ausgewählt. Diese Liste ist nicht vollständig, gibt jedoch einen Überblick der hydraulischen Systeme der Arthropoden.

- Einheimischer Saftkugler (*Glomeris marginata*) durch Muskelbewegung & bewegliche Panzersegmente (Diplodopen) ²¹², Asseln, Hundertertfüssler, Tausendfüssler
- Honigtopfameise (Myrmecocystus mimicus/Campondious Inflamis)
- Termitenköniginnen (Isoptera)
- Schutz-, Wanderameisen (Eciton burchelli) (Königin!) oder allg. Ameisenkönigin
- Raubmilben (*Gamasina*), allg. Milben
- Wander- Wüstenheuschrecken (*Locusta*) (Weiblich ->Legestachel)
- Heuschrecke (Sprungbeine?)
- Krebstiere wie Hummer / Garnelen / Krabben
- Gelenk der Krebsextremitäten, Bewegung durch kaum sklerotisierte Membrane
 & antagonistisch wirkenden Streck- und Beugemuskel²¹³
- Laus (Siphonaptera, Anoplura) Kopflaus (Pediculus humanus / Capitis Pubis)
- Floh (Siphonaptera, Aphaniptera), Sprungmechanismus^{214,215}
- Fliegen (Stech-Tsetse-), Bienen, Wespen
- Bettwanzen
- Libellen/Faltwespen
- Larven, Aufsprengen der Eischale durch kurzzeitiges, blasenartiges Vergrössern des Kopfes²¹⁶
- Koppelung von Insektenorganen²¹⁷

²¹² Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 121

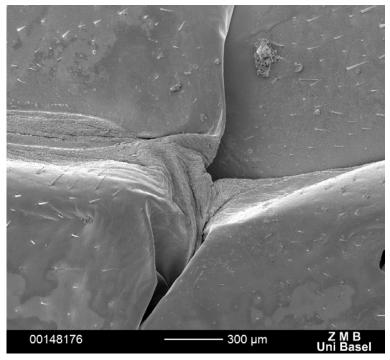
²¹³ Taschenbuch der Zoologie Bd. Allg. Zoologie, H. Geiler, S. 269

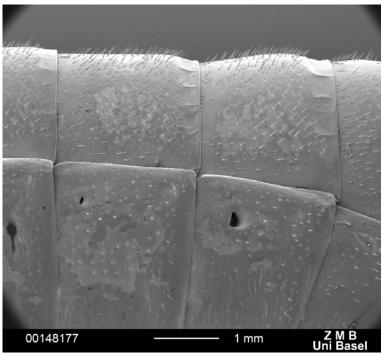
²¹⁴ Patente der Natur, Greguss, S. 67

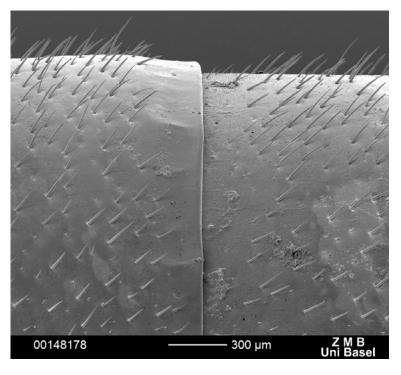
²¹⁵ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 141

²¹⁶ Naturorientierte Lösungsfindung, Bernd Hill, S. 168

²¹⁷ Grundrisse der Insektenkunde, Weber, S. 41







Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 40.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Abdomen**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung:

00148177

Acc : 5000 V
Mag : X 16
WD : 41.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148178

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 42.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

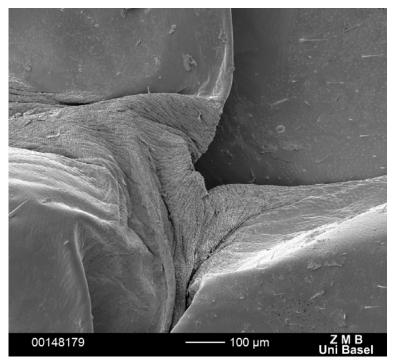
Gerät : Nova NanoSEM 230

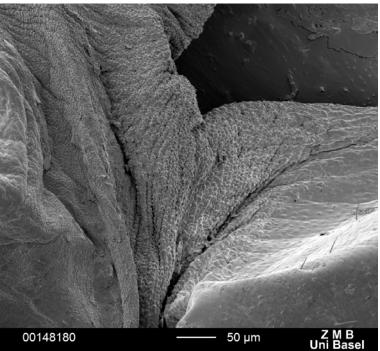
:

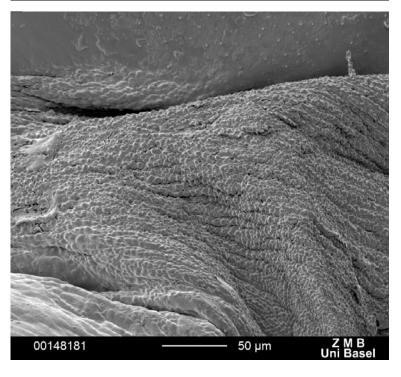
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 100
WD : 41.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Abdomen**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung:

00148180

Acc : 5000 V
Mag : X 201
WD : 40.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

itoration .

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148181

Acc : 5000 V
Mag : X 335
WD : 40.8 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

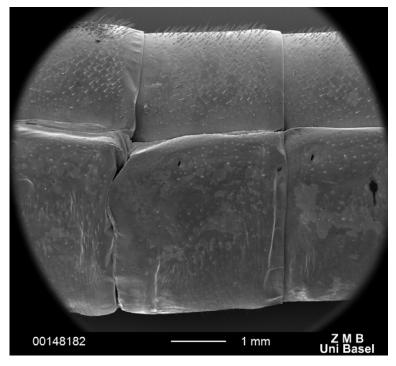
Gerät : Nova NanoSEM 230

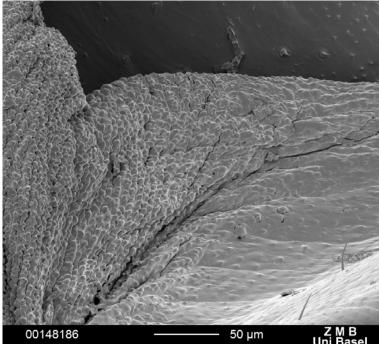
:

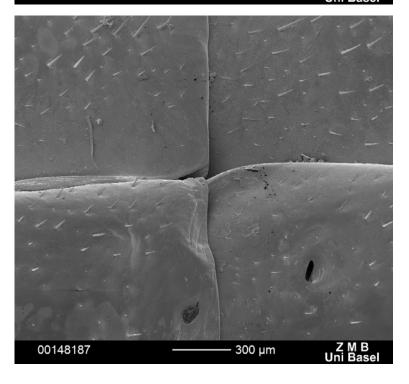
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 14
WD : 40.7 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Abdomen**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung:

00148186

Acc : 5000 V
Mag : X 335
WD : 41.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148187

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 41.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

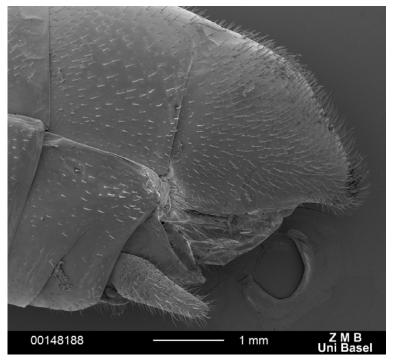
Gerät : Nova NanoSEM 230

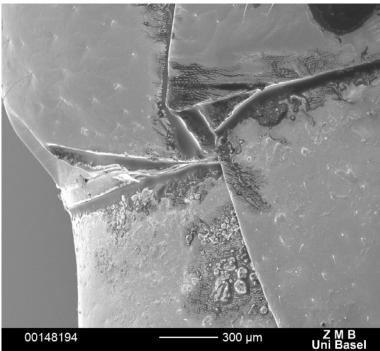
:

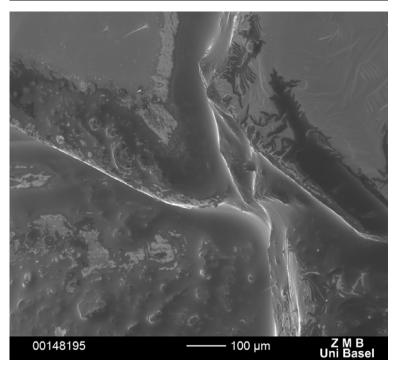
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 18
WD : 42.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Abdomen**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung:

00148194

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 41.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M
Bemerkung : gestreckt

00148195

Acc : 5000 V
Mag : X 100
WD : 41.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

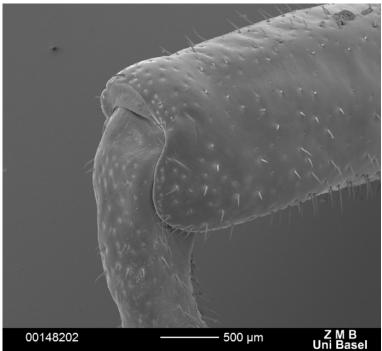
:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M
Bemerkung : gestreckt







Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 41.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M
Bemerkung : gestreckt

00148202

Acc : 5000 V
Mag : X 30
WD : 37.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Gelenk Klaue
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148203

Acc : 5000 V
Mag : X 15
WD : 34.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

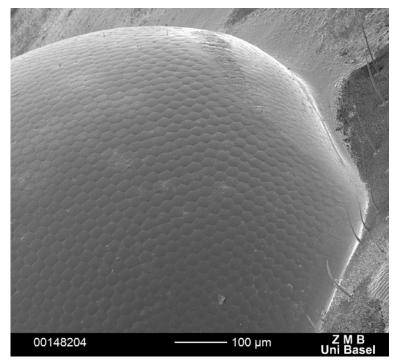
Gerät : Nova NanoSEM 230

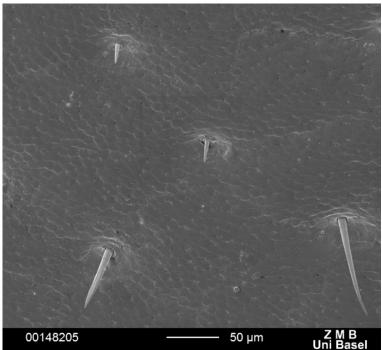
:

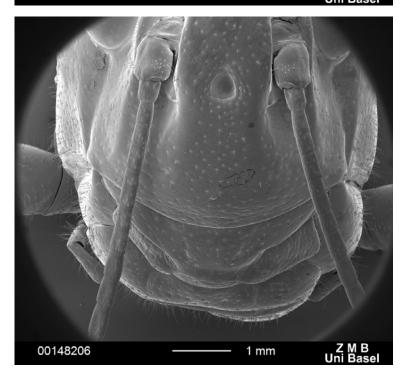
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Kopf**Projekt : **GRAF.M**







Acc : 5000 V
Mag : X 134
WD : 35.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Auge
Projekt : GRAF.M

Bemerkung

00148205

Acc : 5000 V
Mag : X 268
WD : 35.3 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Haare**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung :

00148206

Acc : 5000 V
Mag : X 15
WD : 35.3 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

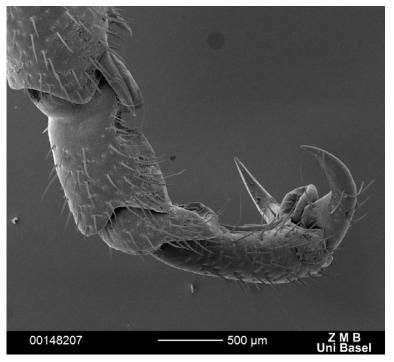
Gerät : Nova NanoSEM 230

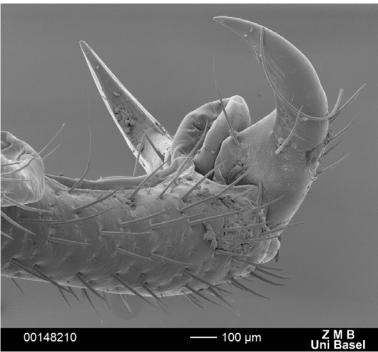
:

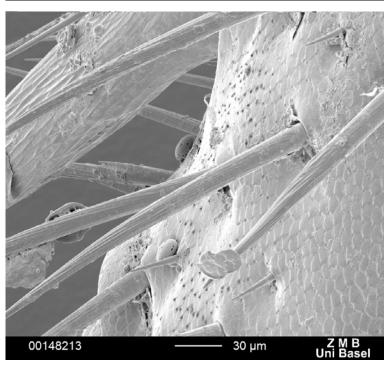
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Haare
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 33
WD : 41.4 mm

Detektor : 2

Mode : SE

Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148210

Acc : 5000 V
Mag : X 67
WD : 42.7 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148213

Acc : 5000 V
Mag : X 402
WD : 41.8 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

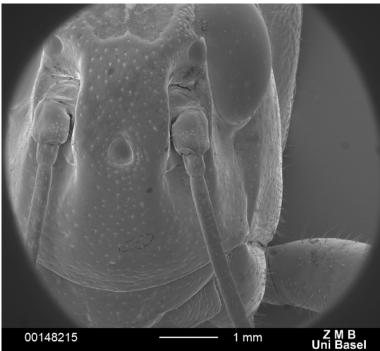
:

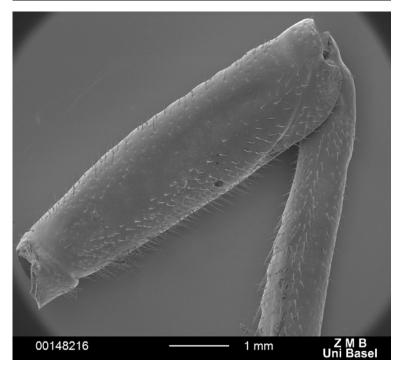
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V Mag : X 39 WD : 43.7 mm

Detektor : 3 : SE Mode Image Mode : ETD

Iteration

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

: 2015/25 Auftrag Nr.

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue : GRAF.M Projekt

Bemerkung

00148215

Acc : 5000 V Mag : X 15 WD : 35.1 mm

Detektor : 3 Mode : SE Image Mode : ETD Iteration

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue Projekt : GRAF.M

Bemerkung

00148216

: 5000 V Acc Mag : X 15 WD : 44.8 mm

Detektor : 3 Mode : SE Image Mode : ETD Iteration

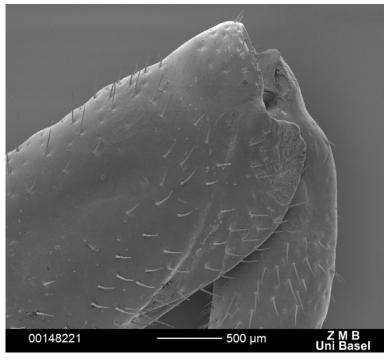
Date : 24.02.2015

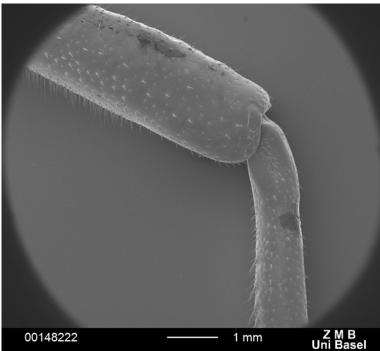
Gerät : Nova NanoSEM 230

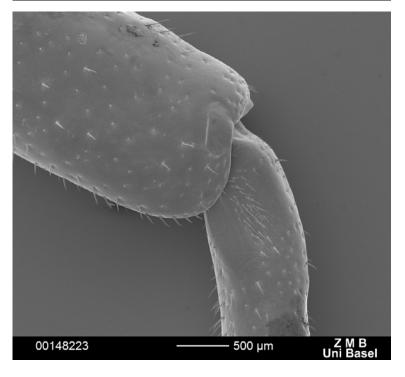
Auftrag Nr. : 2015/25

: wanderheuschrecken Kommentar

Probe : Bein Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 33
WD : 44.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148222

Acc : 5000 V
Mag : X 13
WD : 47.1 mm

Detektor : 3

Mode : SE

Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148223

Acc : 5000 V
Mag : X 26
WD : 43.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

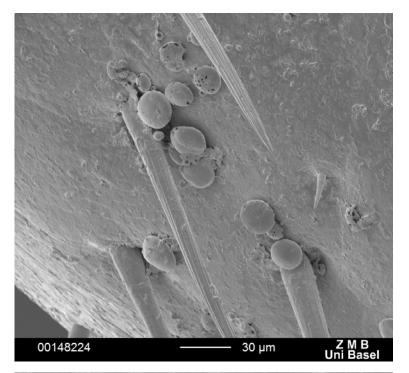
Gerät : Nova NanoSEM 230

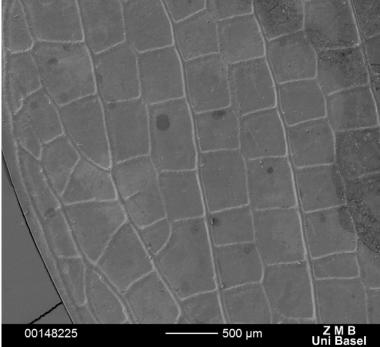
:

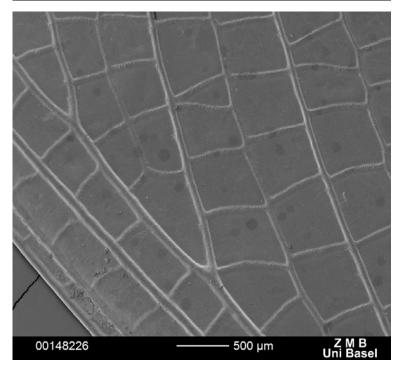
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V Mag : X 435 WD : 43.8 mm

Detektor : 3 : SE Mode Image Mode : ETD

Iteration

: 24.02.2015 Date

Gerät : Nova NanoSEM 230

: 2015/25 Auftrag Nr.

Kommentar : wanderheuschrecken

: Bein Probe : GRAF.M Projekt

Bemerkung

00148225

Acc : 5000 V Mag : X 26 WD : 47.2 mm

Detektor : 3 Mode : SE Image Mode : ETD Iteration

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Flügel Projekt : GRAF.M

Bemerkung

00148226

: 5000 V Acc Mag : X 26 WD : 44.8 mm

Detektor : 3 Mode : SE Image Mode : ETD Iteration

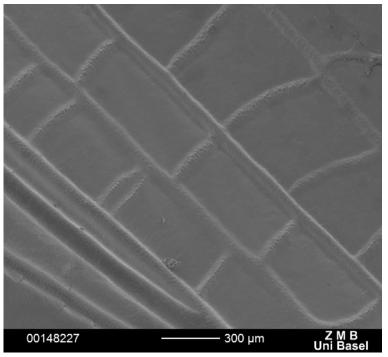
Date : 24.02.2015

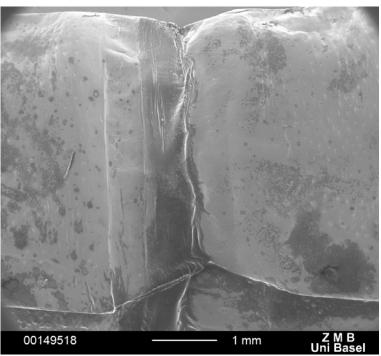
Gerät : Nova NanoSEM 230

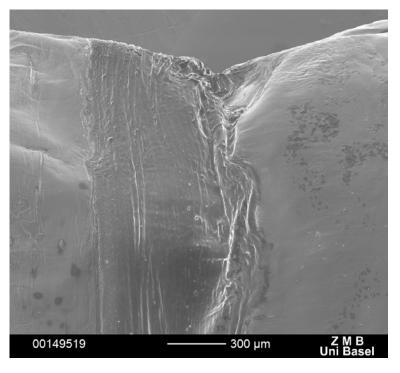
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Flügel Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 45.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Flügel
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149518

Acc : 5000 V
Mag : X 16
WD : 42.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149519

Acc : 5000 V

Mag : X 50

WD : 42.7 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

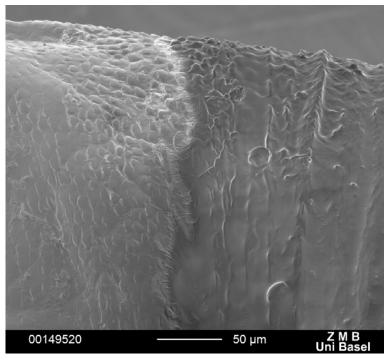
:

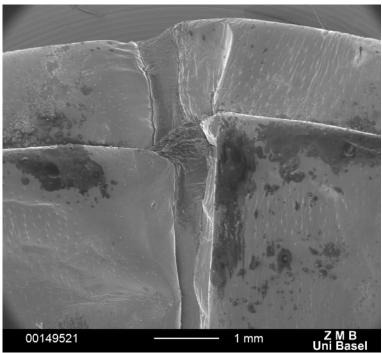
Auftrag Nr. : 2015/25

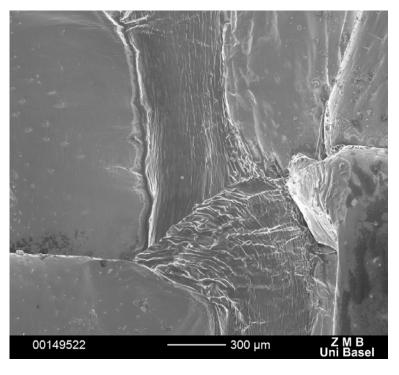
Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 335
WD : 42.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149521

Acc : 5000 V
Mag : X 16
WD : 43.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Iteration

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00149522

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 43.1 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

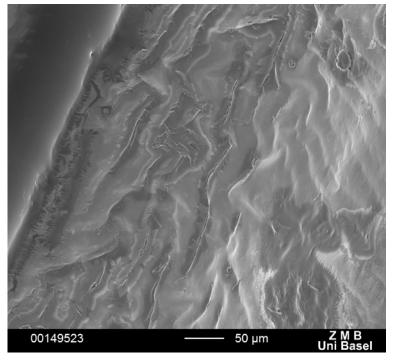
:

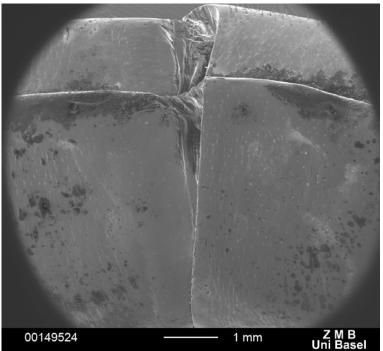
Auftrag Nr. : 2015/25

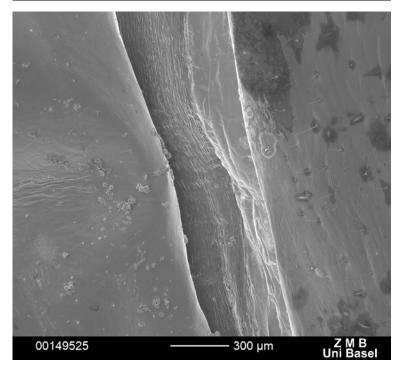
Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 201
WD : 41.5 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Iteration

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149524

Acc : 5000 V
Mag : X 13
WD : 41.9 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00149525

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 44.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

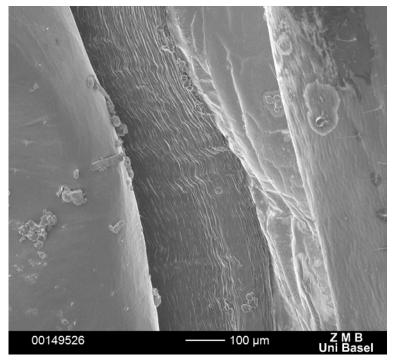
:

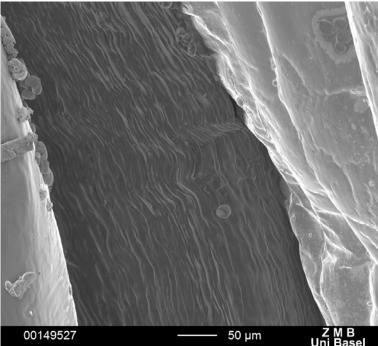
Auftrag Nr. : 2015/25

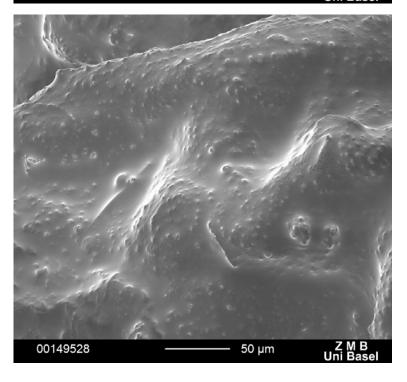
Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 100
WD : 44.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149527

Acc : 5000 V
Mag : X 201
WD : 44.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE

Iteration :

Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00149528

Acc : 5000 V

Mag : X 335

WD : 40.2 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

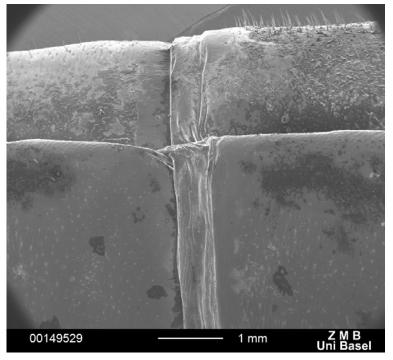
:

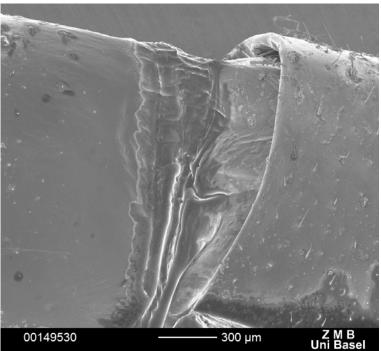
Auftrag Nr. : 2015/25

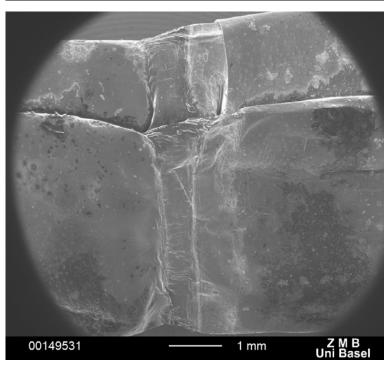
Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 16
WD : 40.0 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149530

Acc : 5000 V

Mag : X 50

WD : 42.8 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149531

Acc : 5000 V
Mag : X 13
WD : 43.2 mm
Detektor : 2.5

Mode : **SE** Image Mode : **ETD**

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

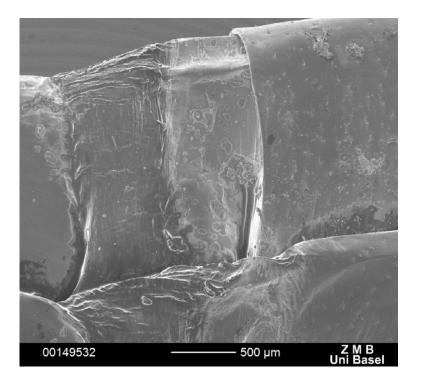
:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M



Acc : 5000 V
Mag : X 33
WD : 41.6 mm

Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

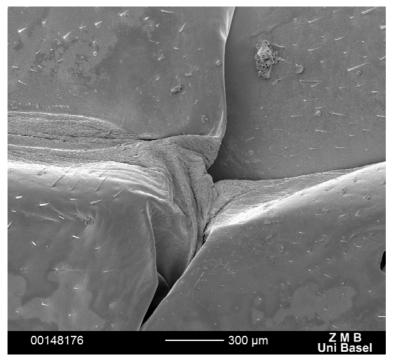
:

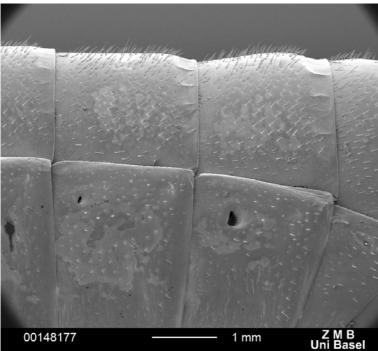
Auftrag Nr. : 2015/25

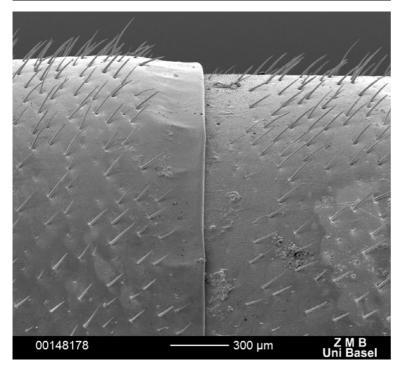
Kommentar:

Probe : **Abdomen gedehnt**

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 40.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148177

Acc : 5000 V
Mag : X 16
WD : 41.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148178

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 42.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

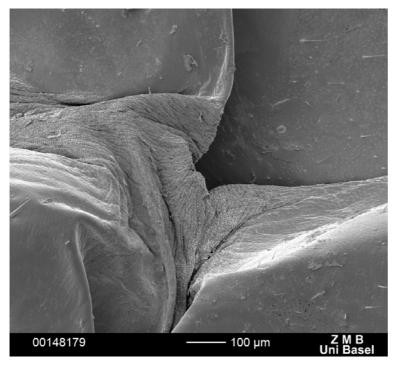
Gerät : Nova NanoSEM 230

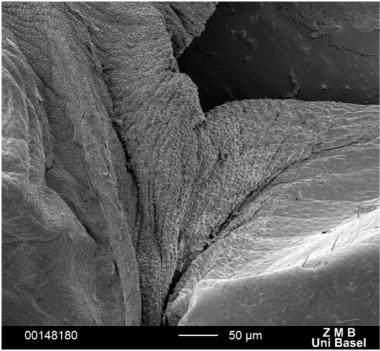
:

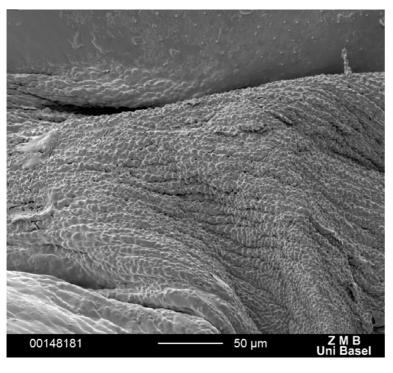
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 100
WD : 41.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Abdomen**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung:

00148180

Acc : 5000 V
Mag : X 201
WD : 40.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148181

Acc : 5000 V
Mag : X 335
WD : 40.8 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

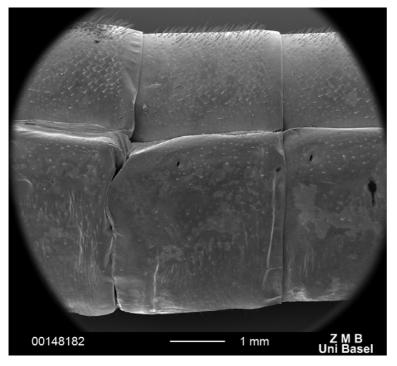
Gerät : Nova NanoSEM 230

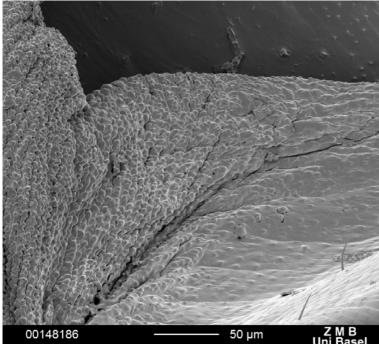
:

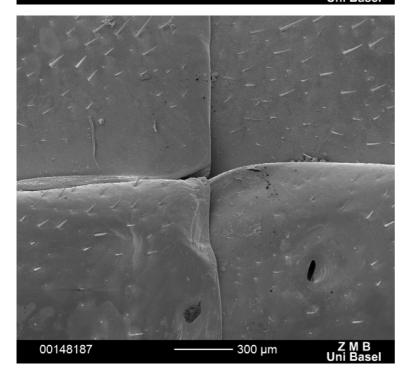
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 14
WD : 40.7 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Abdomen**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung:

00148186

Acc : 5000 V
Mag : X 335
WD : 41.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148187

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 41.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

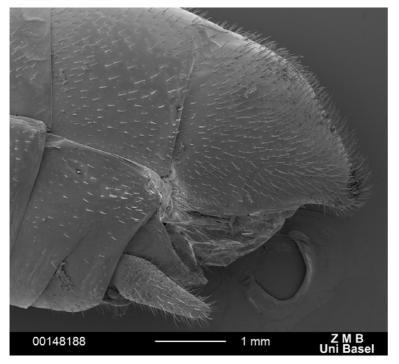
Gerät : Nova NanoSEM 230

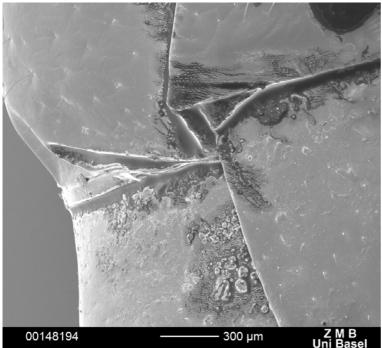
:

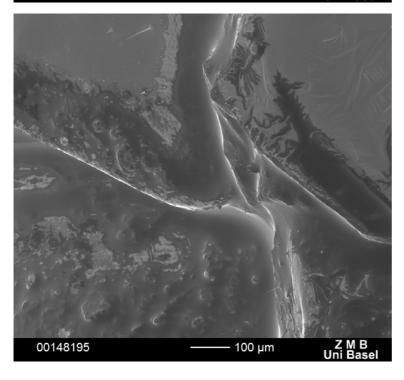
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 18
WD : 42.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Abdomen**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung:

00148194

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 41.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M
Bemerkung : gestreckt

00148195

Acc : 5000 V
Mag : X 100
WD : 41.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

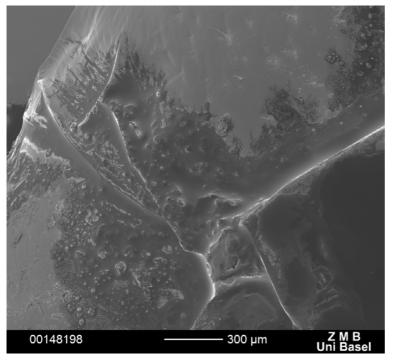
Gerät : Nova NanoSEM 230

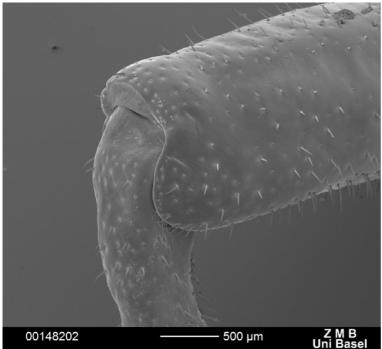
:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M
Bemerkung : gestreckt







Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 41.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Abdomen
Projekt : GRAF.M
Bemerkung : gestreckt

00148202

Acc : 5000 V
Mag : X 30
WD : 37.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Gelenk Klaue
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148203

Acc : 5000 V
Mag : X 15
WD : 34.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

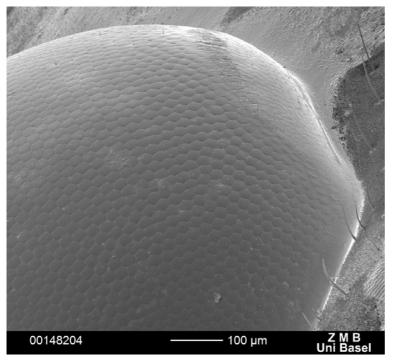
Gerät : Nova NanoSEM 230

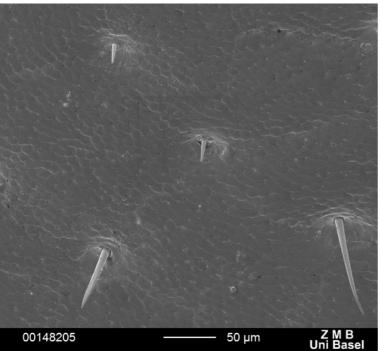
:

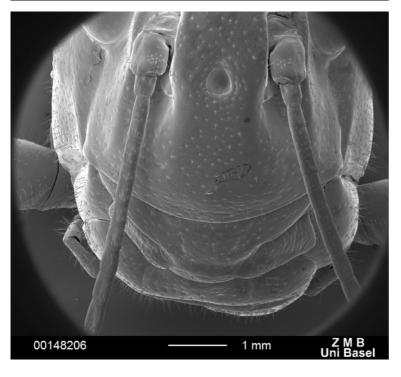
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Kopf
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 134
WD : 35.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Auge
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148205

Acc : 5000 V
Mag : X 268
WD : 35.3 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Haare**Projekt : **GRAF.M**

Bemerkung :

00148206

Acc : 5000 V
Mag : X 15
WD : 35.3 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

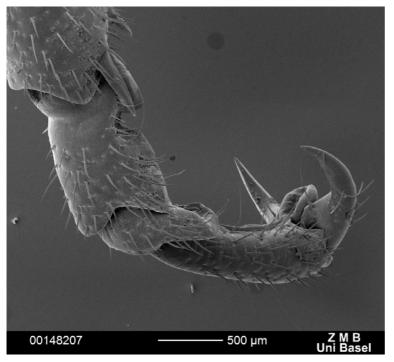
Gerät : Nova NanoSEM 230

:

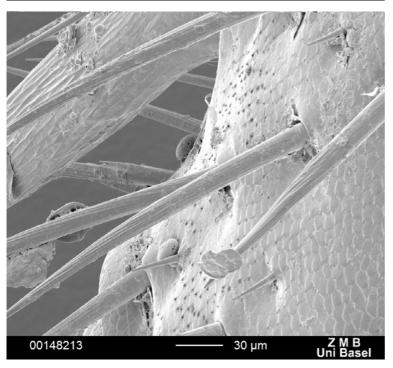
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : **Haare**Projekt : **GRAF.M**







Acc : 5000 V
Mag : X 33
WD : 41.4 mm

Detektor : 2

Mode : SE

Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148210

Acc : 5000 V
Mag : X 67
WD : 42.7 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148213

Acc : 5000 V
Mag : X 402
WD : 41.8 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

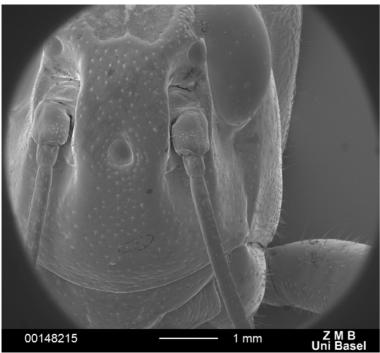
:

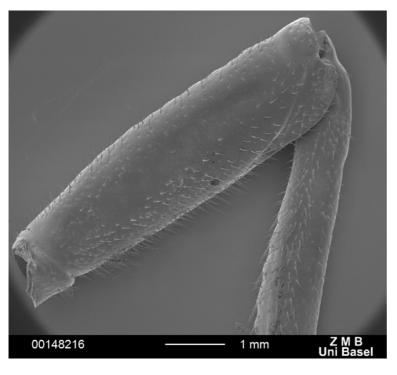
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V Mag : X 39 WD : 43.7 mm

Detektor : 3 : SE Mode Image Mode : ETD Iteration

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue : GRAF.M Projekt

Bemerkung

00148215

Acc : 5000 V Mag : X 15 WD : 35.1 mm

Detektor : 3 Mode : SE Image Mode : ETD Iteration

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Klaue Projekt : GRAF.M

Bemerkung

00148216

: 5000 V Acc Mag : X 15 WD : 44.8 mm

Detektor : 3 Mode : SE Image Mode : ETD Iteration

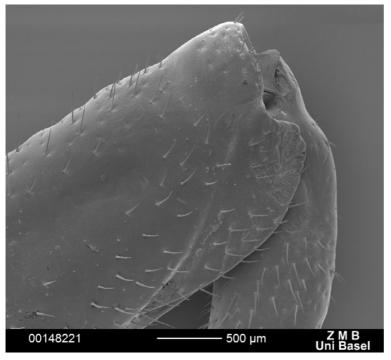
Date : 24.02.2015

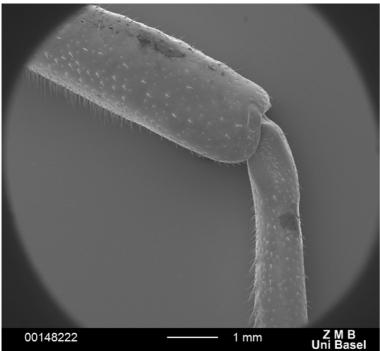
: Nova NanoSEM 230 Gerät

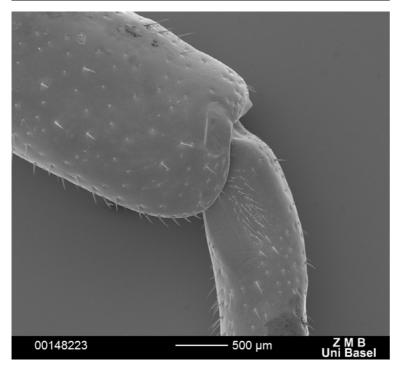
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein : GRAF.M Projekt







Acc : 5000 V
Mag : X 33
WD : 44.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration : 24.02

Date : **24.02.2015**

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148222

Acc : 5000 V
Mag : X 13
WD : 47.1 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

ileration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148223

Acc : 5000 V
Mag : X 26
WD : 43.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

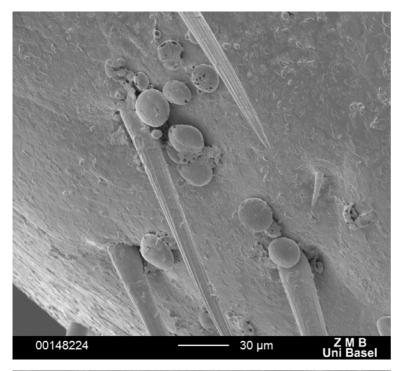
Gerät : Nova NanoSEM 230

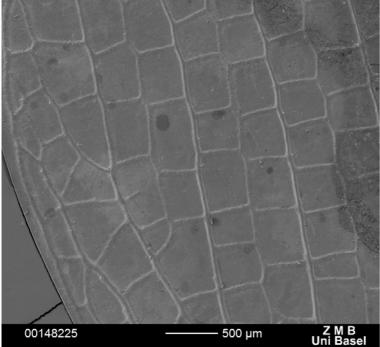
:

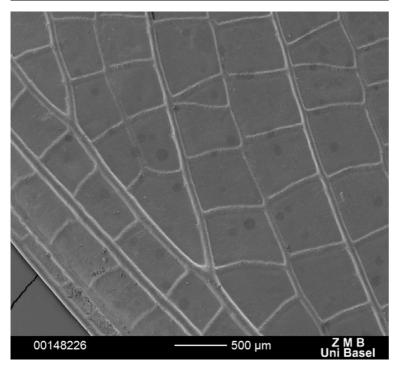
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 435
WD : 43.8 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Bein
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00148225

Acc : 5000 V
Mag : X 26
WD : 47.2 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Flügel
Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00148226

Acc : 5000 V
Mag : X 26
WD : 44.8 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 24.02.2015

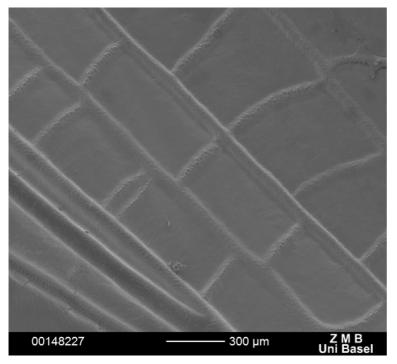
Gerät : Nova NanoSEM 230

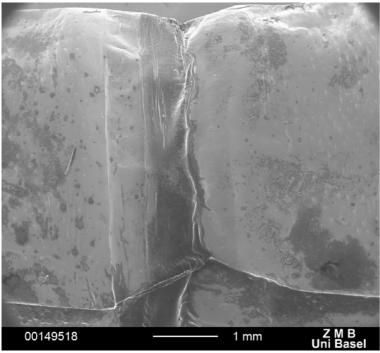
:

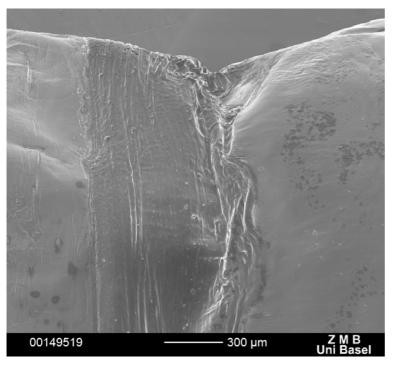
Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Flügel
Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 45.9 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 24.02.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar : wanderheuschrecken

Probe : Flügel
Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149518

Acc : 5000 V
Mag : X 16
WD : 42.6 mm

Detektor : 3
Mode : SE
Image Mode : ETD
Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149519

Acc : 5000 V

Mag : X 50

WD : 42.7 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

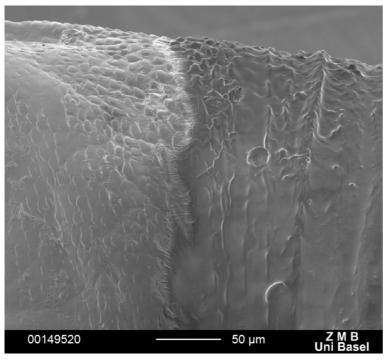
:

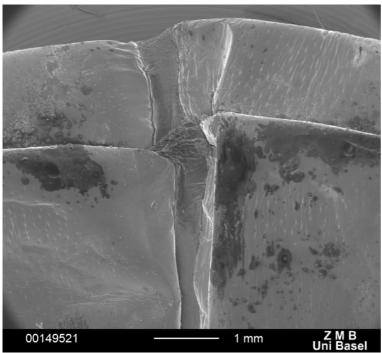
Auftrag Nr. : 2015/25

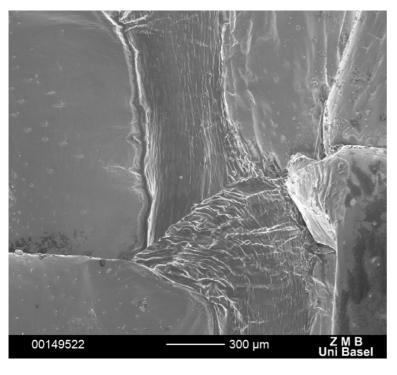
Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 335
WD : 42.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149521

Acc : 5000 V

Mag : X 16

WD : 43.3 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00149522

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 43.1 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

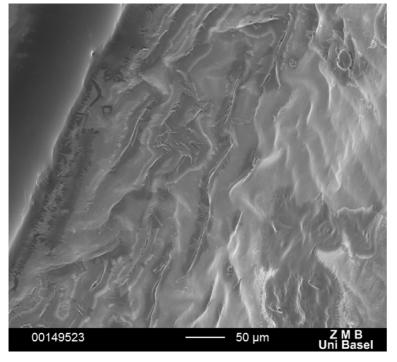
:

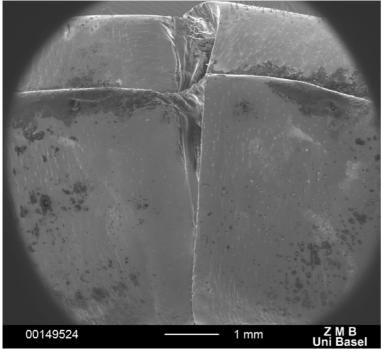
Auftrag Nr. : 2015/25

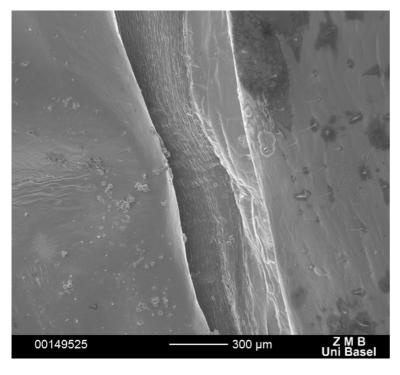
Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : **GRAF.M**







Acc : 5000 V
Mag : X 201
WD : 41.5 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Iteration

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149524

Acc : 5000 V
Mag : X 13
WD : 41.9 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Iteration

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung :

00149525

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 44.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

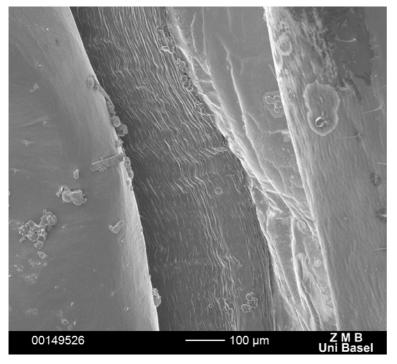
:

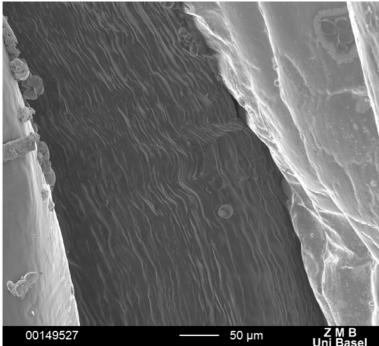
Auftrag Nr. : 2015/25

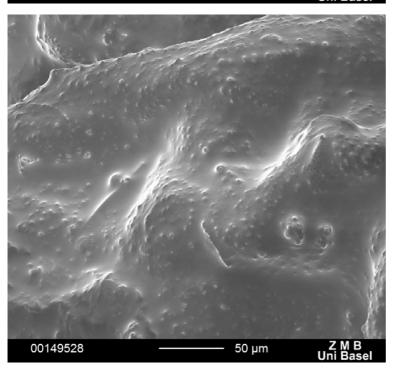
Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 100
WD : 44.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149527

Acc : 5000 V
Mag : X 201
WD : 44.3 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE

Iteration :

Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149528

Acc : 5000 V

Mag : X 335

WD : 40.2 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Iteration :

Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

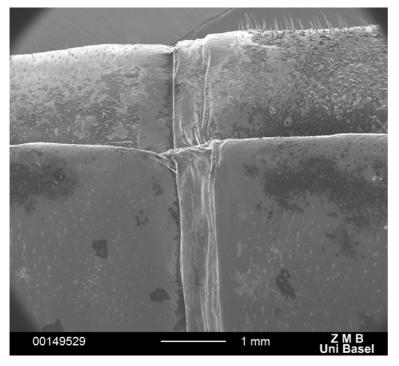
:

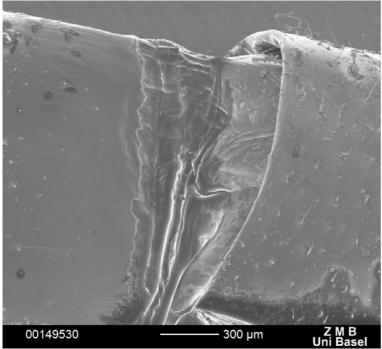
Auftrag Nr. : 2015/25

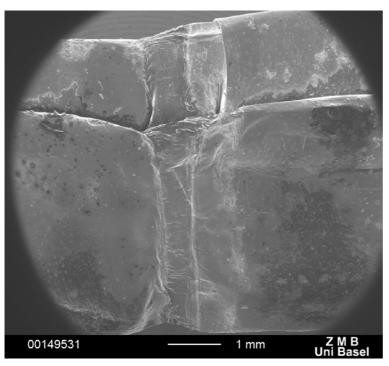
Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M







Acc : 5000 V
Mag : X 16
WD : 40.0 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE
Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149530

Acc : 5000 V
Mag : X 50
WD : 42.8 mm
Detektor : 2.5
Mode : SE

Iteration :

Image Mode : ETD

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar :

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M

Bemerkung:

00149531

Acc : 5000 V

Mag : X 13

WD : 43.2 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

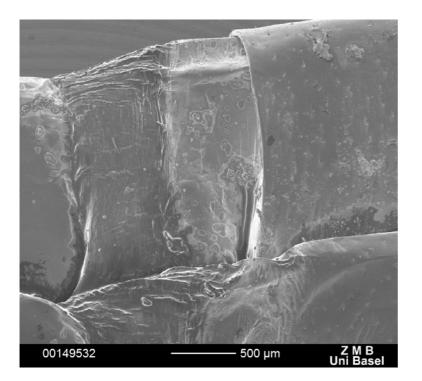
:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : **GRAF.M**



Acc : 5000 V
Mag : X 33
WD : 41.6 mm

Detektor : 2.5

Mode : SE

Image Mode : ETD

Iteration :

Date : 26.03.2015

Gerät : Nova NanoSEM 230

:

Auftrag Nr. : 2015/25

Kommentar:

Probe : Abdomen gedehnt

Projekt : GRAF.M