

man Evolution und einen bestimmten Evolutionsverlauf voraussetzt; das Organ selber liefert keinen objektiven Anhaltspunkt für eine Rückbildung.

Das Beispiel der Abdominalknochen der Walartigen zeigt einmal mehr, dass zunehmende Kenntnisse über Form-/Funktions-Zusammenhänge die Liste mutmaßlicher rudimentärer Organe verkleinern. Aus dieser Liste musste kürzlich auch der Wurmfortsatz des Blinddarms endgültig gestrichen werden (vgl. ULLRICH 2013).

[ARVY L (1976) Some critical remarks on the subject of the cetacean „girdles“. In: PILLERI G (ed) Investigations on Cetacea. Vol. VII. Bern • BEHRMANN G (1994) Die Bewegungskoordination des Penis während der Kopulation beim Schweinswal *Phocoena phocoena* (Linné 1758). Säugetierkd. Inf. 3, 611-616 • DINES JP, OTÁROLA-CASTILLO E, RALPH P, ALAS J, DALEY T, SMITH AD & DEAN MD (2014) Sexual selection targets cetacean pelvic bones. Evolution, doi: 10.1111/evo.12516 • JUNKER R (2002) Ähnlichkeiten, Rudimente, Atavismen. Design-Fehler oder Design-Signale? Studium Integrale. Holzgerlingen • ULLRICH H (2013) Der Wurmfortsatz: Vom Nichtsnutz zum Mysterium. Stud. Integr. J. 20, 111-115 • YABLOKOV AV (1974) Variability of mammals. Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi.] R. Junker

■ Fliegen – mit Kupplung und Getriebe

Unter den Insekten finden sich viele Arten, die in der Lage sind, aktiv zu fliegen. Die dabei zum Einsatz kommenden Flügel weisen erstaunliche Größenunterschiede auf; so gibt es Wespen mit Flügeln mit einer Spannweite vom Bruchteil eines Millimeters und andererseits Falter, deren Flügelspitzen bis zu 30 cm voneinander entfernt sind. Je kleiner die Flügel sind, desto häufiger muss das Insekt mit den Flügeln schlagen, um sich mit der entsprechend geringeren Tragfläche in den Luftraum aufschwingen zu können. Bei kleinen Insekten wurden Frequenzen von über 100 Hz gemessen.

Obwohl der Insektenflug schon lange Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen ist, sind viele Aspekte zu dessen Biomechanik bisher nicht genau verstanden. Moderne Untersuchungsmethoden wie z.B. der Einsatz von Hochge-

schwindigkeitskameras machen neue Fragestellungen für die Forschung zugänglich.

Die Zweiflügler (Diptera) – dazu gehören die Insekten, die wir in der Alltagssprache als Fliegen und Mücken bezeichnen – besitzen neben ihrem namensgebendem *einen* Flügelpaar als notwendige und typische Struktur noch ein Paar Schwingkölbchen. Dabei handelt es sich um keulenförmige bewegliche Anhänge, die auch als Halteren bezeichnet werden und den Insekten zur Bestimmung und Kontrolle der Lage des Körpers im Raum dienen. Dipteren bewegen die Halteren synchron zu den Flügeln.

Eine indische Arbeitsgruppe hat nun die biomechanischen Grundlagen der Koordination von Halteren und Flügeln an Soldatenfliegen (*Hermetia illucens*) untersucht (DEORA et al. 2015). Dabei stellten die Wissenschaftler fest, dass die Synchronisierung des Flügelschlags durch eine mechanische Kopplung über das sogenannte Scutellum, einer verhärteten (sklerotisierten) Struktur am Rücken des Brustbereichs (Thorax) erfolgt. Bei manchen Käfern ist das Scutellum als kleiner Keil zwischen den Flügeldecken erkennbar. Durchtrennt man das Scutellum bei Soldatenfliegen, so schlagen der rechte und der linke Flügel nicht mehr gleichzeitig auf und ab; klebt man die beiden Scutellumhälften wieder zusammen, ist der synchrone Flügelschlag wieder möglich. Mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnte demonstriert werden, dass die Halteren antizyklisch mit den Flügeln schlagen und zwar exakt synchron. Auch diese Kopplung hat eine mechanische Grundlage, die mikroskopisch lokalisiert werden konnte, deren genaue Funktion derzeit aber noch nicht verstanden ist.

Der Flügelschlag selbst erfolgt indirekt über muskuläre Aktivität im Thorax. Dabei fanden die Autoren heraus, dass die Flügel an ihrer Aufhängung über eine Kupplung und ein 4-Stufen-Getriebe mit dem muskulären Antrieb verbunden werden können. Diese Zusammenhänge sind bereits zuvor von anderen Autoren beschrieben worden (MIYAN & EWING 1985), aber DEORA et al.

konnten diese bestätigen, detaillierter darstellen und so zu einem vertieften Verständnis der biomechanischen Grundlagen beitragen.

Die Autoren der Studie stellen abschließend fest, dass die von ihnen beschriebenen biomechanischen Strukturen für die schnelle Koordination von Flügelschlag und Halteren von grundlegender Bedeutung ist und vermutlich auch bei anderen Insekten vorkommt. Die beschriebenen biomechanischen Strukturen stellten auch wichtige Design-Prinzipien für die Entwicklung von Mikrorobotern nach dem Vorbild von Insekten dar.

[DEORA T, SINGH AK & SANE SP (2015) Biomechanical basis of wing and haltere coordination in flies. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, doi/10.1073/pnas.1412279112 • MIYAN JA & EWING AW (1985) How Diptera move their wings: A re-examination of the wing base articulation and muscle systems concerned with flight. Phil. Trans. R. Soc. London B 371, 271-302.] H. Binder

■ Kurzflügler – hocheffiziente Flügel-Falttechnik

Viele geflügelte Insekten können ihre Flügel falten und damit in Ruhestellung deren Platzbedarf reduzieren. Ameisen und Bienen als Vertreter der Hautflügler (Hymenoptera) falten ihre Vorderflügel in Längsrichtung, während die Faltung bei Heuschrecken (Orthoptera) fächerförmig erfolgt. In beiden Fällen ist die erzielte Platzersparnis gering. Ohrwürmer (Dermaptera) falten ihre Flügel in erweiterter, komplexer fächerförmiger Faltung, wobei die geschlossenen Fächer weiter gefaltet werden, so dass sie unter den kleinen Deckflügeln (Elytren) verstaut werden können. Die komplex gefalteten Flügel müssen zuverlässig gefaltet und für den Einsatz auch schnell entfaltet werden können. Trotz der im Flügel vorhandenen Falten müssen die beim Flug entfaltenen Flügel die beim Flügelschlag auftretenden Kräfte aufnehmen können, d.h. eine entsprechende Stabilität aufweisen. Aufgrund dieser Eigenschaften sind Insekten mit faltbaren Flügeln sowohl für Entomologen (Insektenkundler) als auch für Ingenieure von außerordentlichem Interesse.

Die komplexesten bekannten Faltmuster und -mechanismen finden sich bei einer Gruppe von Käfern, die als Kurzflügler (Staphylinidae) bezeichnet werden. Die Elytren dieser Käfer sind auffällig kurz und lassen einen großen Teil des Hinterleibs (Abdomen) unbedeckt (Abb.1). Dadurch sind diese Käfer extrem beweglich, was ihnen die Besiedlung anspruchsvoller Lebensräume ermöglicht. Kurzflügler weisen in ihren Flügeln zwei verschiedene, asymmetrische Faltungen auf. Wie die Flügel unter Zuhilfenahme des Abdomens gefaltet werden, war bisher nur sehr oberflächlich bekannt. Nun haben SAITO et al. (2014) die Faltung und Entfaltung der Flügel beim Kurzflügler *Cafius vestitus* mit Hochgeschwindigkeitskameras dokumentiert und analysiert. Das symmetrische Flügelpaar wird teilweise übereinandergelegt, wobei jeder der beiden Flügel wahlweise über dem andern liegen kann, um beide gemeinsam dann asymmetrisch zu falten. Bei anderen Insekten werden typischerweise die gefalteten Flügel übereinandergelegt. In beiden Flügeln sind also zwei Faltmuster angelegt und die Flügel werden dann durch das Abdomen zunächst wahlweise entweder von links nach rechts oder umgekehrt gefaltet und anschließend durch Anheben des Hinterleibs weiter kompakt zusammengelegt. Die Faltungen erfolgen entlang definierter Faltlinien, wobei auch Flügeladern mit einbezogen sind. Diese werden aber den bisherigen Kenntnissen zufolge nicht gefaltet, sondern unter Spannung gebogen und speichern so Energie, die für eine schnelle Entfaltung genutzt werden kann.

Die Autoren deuten in ihrer Veröffentlichung an, dass die asymmetrische komplexe Faltung von symmetrischen Flügeln sowie die energiespeichernde Krümmung von Flügeladern nach weiteren Studien und einem besseren Verständnis für technische Entwicklungen von großem Nutzen sein könnten. Sie nennen die Optimierung von Solarzellenpanels und Antennensystemen für Satelliten oder auch Alltagsgegenstände wie Schirme und Fächer.

Es ist wieder einmal erstaunlich,

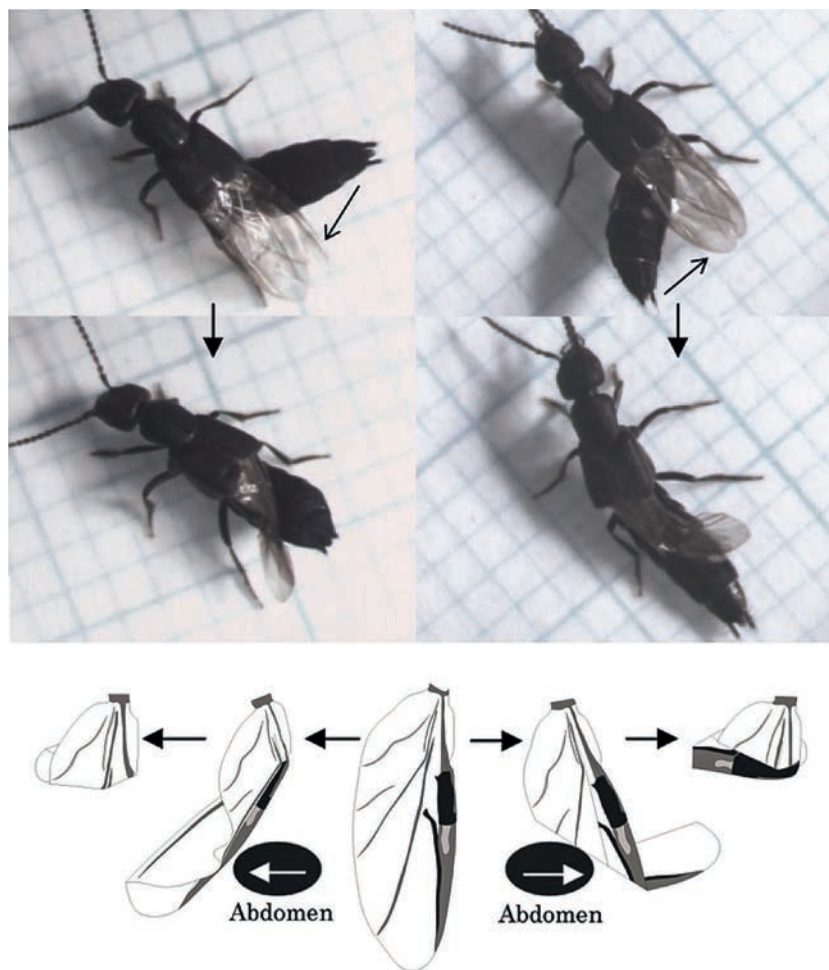


Abb. 1 Von zwei Seiten kann der Kurzflügler *Cafius vestitus* durch seinen sehr beweglichen Hinterleib seine übereinandergelegten Flügel in unterschiedlicher Weise entlang entsprechender Faltlinien zusammenfalten. (Aus SAITO et al. 2014; Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

wie durch genaue Beobachtung von Lebewesen, hier kleine unscheinbare Käfer, Impulse für die Konstruktion und Entwicklung von hochtechnisierten Systemen gewonnen werden können.

[SAITO K, YAMAMOTO S, MARUYAMA M & OKABE Y (2014) Asymmetric hindwing foldings in rove beetles. PNAS, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1409468111] H. Binder

■ Afrikanische Pflanze geht in Sachen Bestäubung auf Nummer sicher

Auch in der Pflanzenwelt werden manchmal „Versicherungen“ abgeschlossen, d.h. es werden Vorkehrungen gegen bestimmte Risiken getroffen. Zu solchen Risiken gehört beispielsweise das Ausbleiben der Bestäubung, wodurch die Pflanze keine Samen bilden kann. Um dies zu verhindern, ist bei einer Pflanze in Afrika ein ausgeklügeltes System verwirklicht, das im Notfall trotz

ausbleibender Fremdbestäubung den Bestand der Art sichert.

Zum Erhalt der Vitalität einer Pflanzenart ist Fremdbestäubung, also die Übertragung von Pollen von einem Individuum zum anderen wichtig. Für die Fremdbestäubung sind Pflanzen auf Transporteure angewiesen, die den Pollen einer Pflanze auf die Narbe einer anderen Pflanze derselben Art übertragen: Meist sind das Tiere (in der Regel Insekten), oft der Wind oder manchmal auch Wasser. Bei Tierbestäubung ergeben sich oft Engpässe, z.B. wenn die Bestäuber selten sind oder etwa bei anhaltend schlechtem Wetter nicht zur Verfügung stehen. Manche Arten sind in der Lage, gegen Ende der Blühzeit auf Selbstbestäubung umzuschalten, was eine Art Versicherung im Notfall ist. Selbstbestäubung ist zwar nur zweite Wahl, aber immer noch besser als gar keine Bestäubung.

Jonathan KISSLING von den Universitäten Neuenburg und Lausanne und Spencer BARRETT von der