



Von der Raupe zur Drohne - Leichtbau in Anlehnung an die Natur

Hannah Seibel,
Manfred Hahn

Schriftenreihe der Wilhelm Büchner Hochschule

Ausgabe 4 / 2022

Hannah Seibel, Manfred Hahn

Schriftenreihe der Wilhelm Büchner Hochschule

Herausgeber Forschungsausschuss der Wilhelm Büchner Hochschule
04.03.2022

Wilhelm Büchner Hochschule

Impressum

ISSN (Online) 2751-0514

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

©Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Werden Personenbezeichnungen aus Gründen der besseren Lesbarkeit nur in der männlichen oder weiblichen Form verwendet, so schließt dies das jeweils andere Geschlecht mit ein.

Herausgeber: Forschungsausschuss der Wilhelm Büchner Hochschule

Redaktion: Dr. Marcel Heber

Layout und Satz: Dominik Feldmeier

Einbandentwurf: Gerhard Kienzle

Projektkoordination: Prof. Dr. Rainer Eisland

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Von der Raupe zur Drohne – Leichtbau in Anlehnung an die Natur

Hannah Seibel, Manfred Hahn

Zusammenfassung Dieser Beitrag ist eine Zusammenfassung der technischen Möglichkeiten der Insektenforschung mit Fokus auf die Metamorphose der Raupe zum Schmetterling. Hauptaspekte beziehen sich auf die Raupenseide, die Schmetterlingsflügelstruktur und die Aerodynamik des Schmetterlingsflugs und wie man sie in fortschrittliche Technik für ein Mikroluftfahrzeug umwandelt. Die Raupenseide ist eines der stärksten Naturmaterialien. Seine technische Nachbildung ist stärker als Stahl, aber viel leichter. Es hat großes Potenzial für zukünftige Bauarbeiten, auch weil es aus natürlichen Proteinen besteht. Die Struktur des Schmetterlingsflügels ist in Jahrmillionen der Evolution konstruiert und daher für die spezifischen aerodynamischen Kräfte konstruiert, die auf den Flügel einwirken. Die Oberfläche ist mit Schuppen bedeckt, die die Luft kontrolliert in und um den Flügel leiten, um den Auftrieb beim Abschlag zu unterstützen. Die aerodynamischen Kräfte, die beim Schlagen wirken, wurden lange Zeit nicht untersucht. Heutige Untersuchungen mit Rauch zeigen die Vorderkantenwirbel, die einer der Hauptgründe für die Schlagflugtechnik eines Schmetterlings sind. Noch sind flatternde Mikrodrohnen noch nicht ausgereift. Kritische Teile sind die Energieversorgung und die Flugdauer.

Keywords: Bionik, Leichtbau, Mikrodrohne, Schmetterling

Abstract This paper is a summary of the technical possibilities of insect research with focus on the metamorphosis of the caterpillar to a butterfly. Main aspects will refer to the caterpillar silk, the butterfly wing structure and aerodynamics of the butterfly flight and how to convert them into advanced technic for a micro air vehicle. The caterpillar silk is one of the strongest natural materials. Its technical replica is stronger than steel but much lighter. It has great potential in future construction work, also because it is made of natural proteins. The butterfly wing structure is designed by millions of years of evolution and therefore constructed for the specific aerodynamic forces which act on the wing. The surface is covered with scales which lead the air in a controlled way in and around the wing to support the lift during the downstroke. The aerodynamic forces that act during the flapping were long time not examined. Nowadays investigations using smoke reveal the leading edge vortices which are one of the main reasons for the flapping flight technique of a butterfly. Still flapping microdrones are not fully developed. Critical parts are the energy supply and the flight duration.

Keywords: Bionics, Lightweight construction, Microdrone, Butterfly

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Analytische Vorgehensweise	2
3	Technische Biologie im Leichtbau	3
4	Raupe – Schmetterling – Mikrodrohne	7
5	Raupenseide	8
6	Schmetterlingsflug	16
7	Flügelstruktur	30
8	Fazit	42
9	Ausblick	44
	Literaturverzeichnis	46

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1 Rückseite einer Riesen-Seerose [NIC14] Zu sehen sind die starken Verästelungen, die für die hohe Flächenbelastbarkeit sorgen..... 4
- Abbildung 2 Vergleich der Reynoldszahl im Verhältnis zum Gewicht des Fluggerätes. Mikrodrohen besitzen ungefähr die gleiche Reynoldszahl wie fliegende Insekten [SCI21] Im Graf zu sehen ist ein C-5, eins der größten Flugzeuge der Welt [ZWE19], ein Kampfflugzeug der Klasse F-18 [WIE20], ein Segelflieger, ein Pioneer als kleines Propellerflugzeug [PIO21] sowie ein Modellflugzeug 6
- Abbildung 3 Proteinstruktur aufgegliedert in Primärstruktur, Sekundärstruktur mit α - Helix und β -Faltblattstruktur sowie die Tertiärstruktur [STU21] 8
- Abbildung 4 Sekundärstruktur von Proteinen: (a) α -Helix, verbunden durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffatomen (b) antiparallele Faltblattstruktur [SPE21]..... 9
- Abbildung 5 Spannungs-Dehnungsdiagramm für Lösungen mit unterschiedlichen Nanoröhrenmassenanteilen. Auf der x-Achse ist die Bruchdehnung, auf der y-Achse ist die Belastung, also die aufgebrachte Kraft im Verhältnis zur Querschnittsfläche der unbelasteten Probe aufgetragen. Ein Volumenanteil der Nanoröhrchen (V_f) erreicht bei $V_f = 2,3 \cdot 10^{-4}$ die größte Bruchdehnung [BLO07] 11
- Abbildung 6 3D Cocooner der Fa. Fest [FRO16]. Zu sehen ist der Tripod als Handlungssystem und die angebrachte Seidendrüse, durch die das Material frei im Raum gespritzt wird. 12
- Abbildung 7 Großansicht des Ornithoptermechanismus [RIC11] 14
- Abbildung 8 Verhältnis Flugzeit gegen Fluggerätmass e [FLO15]. In Rot sind die flügelschlagenden Drohnen aufgezeigt, in Grün die Rotorflügler und in Blau Drohnen mit starren Flügeln. Man erkennt, dass das Starr- und Rotorflügler die größten Massen aufweisen und die längsten Flugzeiten erreichen. Ornithopter halten sich eher in der Gewichtsklasse kleiner 30 g auf und erreichen aktuell keine längere Flugdauer als 11 Minuten..... 15
- Abbildung 9 Schmetterlingsflügelschlag, a) Aufwärtsbewegung des Flügels, b) Abwärtsbewegung des Flügels, a: Flügel, b: Flügelgelenke, c: Muskulatur zwischen Bauch und Rücken (Corsoventralmuskeln), d: Muskulatur parallel zum Thorax (Longitudinalmuskeln) [SCH18] 17
- Abbildung 10 Clap and peel [ARM16]. Die Zeichnungen unterhalb der Schmetterlingsskizzen visualisieren die entstehenden Luftwirbel um die Flügel beim jeweiligen Abschlagstadium 18
- Abbildung 11 Entstehende Luftwirbel durch die Abwärtsbewegung der Flügel [CLA13]. Die Luftströme des Flügels verwirbeln an den oberen Kanten und umströmen die

Flügelflächen. Bei der Hälfte des Flugabschlages drehen sich die Flügelspitzen nach hinten, um für den Aufschlag in der richtigen Position zu sein	19
Abbildung 12 Ausbreitung der Luftwirbel vom Thorax aus bis an die Flügelspitzen [SRY02] Die Luftwirbel verlaufen fast parallel entlang der oberen Flügelkante.....	20
Abbildung 13 eMotionButterflies der Firma Festo [FRO15].....	21
Abbildung 14 Flapping-Wing Mikrodrohne aus den Niederlanden [ARM16].....	22
Abbildung 15 Schwanzloser Ornithopter nach dem Schwalbenschwanzschmetterlings nachempfunden [TAN10].....	24
Abbildung 16 Verhältnis zwischen Flügelflächenbelastung und Schlagfrequenz von Insekten im Vergleich zum Butterfly-type Ornithopter (BTO) [TAN08]. Die größte Flächenbelastung besitzt die Zikade. Der Ornithopter weist das gleiche Verhältnis von Flügelflächenbelastung zu Schlagfrequenz wie sein natürliches Vorbild auf	25
Abbildung 17 Anstellwinkel des Ornithopterrumpfes im Freiflug in einem Windtunnel [TAN08]. Bei jedem Auf- und Abschlag verändert sich der Anstellwinkel des Rumpfes zwischen 0° und 50°	26
Abbildung 18 Detailanzeige des Drohnendesigns, a) Flügelmechanismus zur Gierdrehmomentregelung, b) Flügelmechanismus zur Nickdrehmomentregelung, c) Schlagmechanismus zur Steuerung des Schub- und Rolldrehmoments [KAR18].....	27
Abbildung 19 : Steuerung der Orientierung im Freiflug. Das Giermoment (Yaw Control) wird durch Ändern des Flügelwurzelwinkels gesteuert, sodass die Schubvektoren des linken und rechten Flügels in gegengesetzte Richtungen zeigen. Das Nickmoment (Pitch Control) wird durch Anpassung des Winkels um die Mittellinie der Flügel gelenkt. Das Rollmoment (Roll Control) wird durch Unterschiede zwischen dem linken und rechten Flügel hinsichtlich deren Einklappwinkel erzeugt. Die grauen Pfeile zeigen die Richtung der nominalen aerodynamischen Schubvektoren, in Rot sind die Pfeile der durch die jeweiligen Momente veränderten Schübe angezeigt [KAR18].....	28
Abbildung 20 Neigung der Mikrodrohne beim Schwebflug, Vorwärtsflug und Seitwärtsflug [KAR18].....	29
Abbildung 21 Nomenklatur für die Hauptbereiche, Falten und Ränder eines verallgemeinerten Insektenflügels [ENT21].....	31
Abbildung 22 Schmetterlingsflügel unter dem Rasterelektronenmikroskop [VER21]. Zu sehen sind die Schuppen bei den ersten drei Vergrößerungen. Im unteren Teil ist die obere Lamina abgebildet (vgl. Modellansicht Abb. 23).....	32
Abbildung 23 Modell einer Schmetterlingsschuppe [KOV10]. Die obere Lamina UL wird über die Trabekel T mit der unteren Lamina LL verbunden.....	33

- Abbildung 24 Drei Typen von Versuchsflügeln, das rote Kreuz markiert den Massenschwerpunkt. Der Massenschwerpunkt des Flügels mit durchgängig dicken Venen ist im Vergleich zu den anderen beiden weiter von der Flügelbasis entfernt. [TAN08] ..34
- Abbildung 25 1.6. Herstellung der Form; 7.-8. Herstellung der Silikonnegativform mittels Polydimethylsiloxane (PDMS); 9. Aufbringen des Parylenfilms auf Glasplatte als Flügelmembran; 10. Polyurethanresin wird auf den Parylenfilm in die Form gefüllt; 11.-12. der fertige Flügel wird von der Glasplatte entnommen und aus der Form entfernt [TAN08]35
- Abbildung 26 Künstlich hergestellter Schmetterlingsflügel mit vier verschiedenen Größen an Venen [TAN08] Die dicksten Venen befinden sich an der Flügelwurzel und verzweigen sich in Richtung Flügelrand.....36
- Abbildung 27 (a) Schematische Aufzeichnung der Heuschreckenflügel mit den Flügelzonen R, B und C, (b) Longitudinale Venen (LV) mit Kreuzvenen (CV). Im hinteren Teil des zweiten Flügelpaares zeigen die longitudinalen Venen eine andere Morphologie als die Kreuzvenen. Während die longitudinalen Venen ein rundes bis epileptisches Muster zeigen, besitzen die Kreuzvenen ein geringeltes Bild, (d) vergrößerte Ansicht der Kreuzvene mit geringeltem Muster [DIR12]39
- Abbildung 28 Struktur der durch Venen eingegrenzte Zellen eines hinteren Flügels mit farblicher Einteilung der Zelllängen. Die mittlere Zelllänge wird zu den äußeren Flügelrändern hin kleiner [DIR12]41
- Abbildung 29 Die neuen Photovoltaikmodule lassen sich in einer gewünschten Farbe herstellen, rund 93% des Sonnenlichtes können die neu entwickelte Oberfläche durchdringen. [EIT21]44
-

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der technischen Eigenschaften zwischen Seide und hochfester Stahl ..	10
Tabelle 2 Flügelabmessung der Flapping-Wing Mikrodrohne	23
Tabelle 3 Übersicht der drei Flügelkonstruktionen Standard, Venenlos und Dickvenen.....	37
Tabelle 4 Zusammenfassung der Steifigkeit und Festigkeit gemessen bei Wüstenheuschrecken in den drei Flügelbereichen.....	40

1 Einleitung

Otto Lilienthal war 1891 der erste Mensch, dem es gelang, den Flug der Vögel zu imitieren und dabei selbst im Gleitflug von der Erde abzuheben. [BOG15] Vögel sind allerdings nicht die einzigen Tiere, die fliegen können. Ingenieure haben schon lange begonnen, Insektenflug als Vorbild für Drohnen zu analysieren. Besonders das Segment der Mikrodrohnen orientiert sich an den kleinen Tieren, da hier nicht die Technik von großen Flugzeugen räumlich verkleinert werden muss, sondern die Drohne die gleichen Dimensionen besitzt, wie ihr natürlichen Vorbild. Die technischen Drohnnachbildungen von Insekten zählen zu den flügelschlagenden Flugobjekten und damit zu den Ornithoptern.

Bisweilen hat sich allerdings weniger der Flügelschlag als Methode der Höhengewinnung etabliert, sondern der dynamische Auftrieb, sprich die Luft, welche die Tragflächen bei hoher Vorwärtsgeschwindigkeit umfließen. Insekten benötigen keine hohe Rumpfgeschwindigkeit, um sich in der Luft zu halten. Während dem Flug erzeugt die Schlagbewegung den benötigten Aufwind. Um den Schmetterlingsflug für Drohnen technisch umzusetzen, wird die Bionik benötigt.

Die Bionik ist eine wissenschaftliche Disziplin, die sich aus den technischen Bestrebungen ergibt, Grundsätze aus der Biologie technologisch nutzbar zu machen. Dabei werden Sachverhalte aus der Natur mit Analyseverfahren aus der Physik und Technik untersucht. Der Begriff Bionik tauchte zum ersten Mal 1960 bei einem Vortrag von J. E. Keto über „Bionics – new frontiers of technology through fusion of the bio- and physiodisciplines“ auf. J.E. Steele ergänzte, dass Bionik eine revolutionäre Wirkung, also eine ganz neue Sichtweise, auf die technische Zukunft bedeutet. Dies ergänzte später Werner Nachtigall, dass die Natur mithilfe technisch-physikalischer Vorgehensweise erforscht werden muss. [NAC13]

Prof. Dr. rer. nat. Werner Nachtigall war und ist in diesem Fachgebiet ein Vorreiter, was die wissenschaftliche Ausarbeitung der Bionik angeht. Ab 1990 war er Mitgründer der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik. Er arbeitete als deutscher Zoologe und Biologe und gilt durch seine mehrjährige Forschung als der Begründer der Bionik in Deutschland. [WIL21]

In der Arbeit soll die Bionik als Verbindung zwischen einem Schmetterling und einem Micro Air Vehicle (MAV) dienen. Es werden in den drei Hauptkapiteln die technische Nutzbarkeit für den Leichtbau von Raupenseide, dem Schmetterlingsflug und der Flügelstruktur durch den aktuellen Stand der Forschung untersucht. Im Ausblick werden zusätzlich zu den drei genannten Aspekten des Insekts drei weitere in der Technik nutzbar gemachte Eigenschaften des Schmetterlings genannt, die zwar nichts mit dem Leichtbau zu tun haben, dennoch als bionisches Vorbild für aktuelle Anwendungen dienen.

2 Analytische Vorgehensweise

Um Vorgänge in der Natur technisch nutzbar zu machen, müssen diese zuerst wahrgenommen werden. Der spätere Erfolg der Technologie hängt entscheidend von den Beobachtungen und Beschreibungen des natürlichen Vorgangs ab. In der heutigen Zeit ist es nicht nur möglich, Phänomene mit dem bloßen Auge zu betrachten, sondern diese auch mit Sensoren weiter zu untersuchen. Hier ein paar Beispiele an Sensoren und ihre erfolgreiche Nutzung in der Beschreibung von Naturphänomenen [NAC10]:

- Strömungssensoren zur Messung von Luftströmungen in Termitenbaus und Übertragung auf das Lüftungssystem in Gebäuden
- Zeitlupenkamera zur Visualisierung des Flügelschlages einer Fliege
- Mikroskop zur Veranschaulichung von Knochenstruktur bezüglich der Lastaufnahme und späteren Dimensionierung von Bauteilen [WOL20]

Das einfache Beschreiben und Beobachten sind nicht mehr ausreichend, wenn in dem zu beobachteten System Wechselbeziehungen zum Beispiel zu Umwelteinflüssen bestehen. Um weiterführende Kenntnisse über den Sachverhalt zu erlangen, sind Experimente unter kontrollierten Bedingungen notwendig. Es wird zwischen dem qualitativen und dem quantitativen Experiment unterschieden. Im qualitativen Experiment kann die Antwort mittels simpler Fragestellung meist durch die Sinnesorgane des Menschen festgestellt werden, die Antwortmöglichkeiten reduzieren sich auf ein „ja“ oder „nein“. [NAC10]

Das quantitative Experiment hingegen wird häufig durch die technischen Möglichkeiten der Messtechnik limitiert. Probleme werden in kleinere, lösbare Teilsysteme untergliedert, die durch messtechnischen Aufwand innerhalb des Experiments erfasst werden.

Nach dem Experiment folgt das Beurteilen mittels Induktion. Aus den gesammelten Fakten werden Vergleiche angestellt und so eine Aussage für die Allgemeinheit getroffen.

Als Herausforderung gilt es, die genaue Funktion des Designs oder der Eigenschaft zu erkennen, um bei der finalen Induktion keine Fehlschlüsse zu ziehen. [NAC10]

3 Technische Biologie im Leichtbau

Bionik wird angewandt, um unter anderem natürliche Vorbilder in technische Anwendungen umzusetzen. In der technischen Biologie wird beim fertigen Produkt die Differentialbauweise, Integralbauweise, integrierende Bauweise und Verbundbauweise unterschieden. Im Leichtbau können alle Ansätze verfolgt werden. Das primäre Ziel ist durch geeignete Konstruktion und Materialauswahl das Gewicht des Fertigproduktes entscheidend zu verringern und dabei trotzdem die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erzielen. [NAC10]

In der Differenzialbauweise sind die Einzelteile additiv miteinander verbunden. Im Normalfall wird diese Bauweise beim Automobilbau verwendet, da nach der EU-Altauto-Richtlinie seit 2005 eine 100% Werkstofftrennung möglich sein muss.

Die Integralbauweise wird bestimmt vom Prinzip des Einzelteiles. Die absolute Anzahl an Bauteilen soll minimiert werden. Meist wird mittels der Integralbauweise das Minimalgewicht erreicht, da funktionsbildende Elemente über die Formgebung realisiert werden. [NAC10] Die Nachteile, dass mit gleichartigen Materialeinsatzes nur homogene Bauteileigenschaften erzielt werden können, werden bei metallenen Werkstücken durch neuartige Fertigungsverfahren wie das Tailored Tempering ausgeglichen. Bei diesem Prozess wird ein partiell beheiztes Werkzeug verwendet, dass eine lokale langsamere Abkühlung des Bauteils in der Warmumformung erreicht. [BEH21]

Die integrierende Bauweise versucht die Nachteile der schlechten Wartung und Recyclings mittels sinnvoller Teilintegrationen auszugleichen. Die letzte Vorgehensweise, die Verbundbauweise, bezieht sich auf Faserverbundkonstruktionen. [NAC10]

Verbundwerkstoffe gewinnen immer mehr an Bedeutung für den Leichtbau. Die Materialien lassen sich durch den Matrixwerkstoff in Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe, Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe oder Polymer-Matrix-Verbundwerkstoffe einteilen. Faserverbundstoffe besitzen eine Matrix, die für die Krafteinleitung in die tragenden Fasern sorgt. Die gezielte Einbettung von gerichteten Fasern mit angepasster Matrix kann die Stabilität des Werkstückes erheblich steigern. Die Bauteile lassen sich allerdings nur schwer spanend bearbeiten, weshalb eine sorgfältige Konstruktion notwendig ist. [BEH21]

Technische Biologie findet sich heutzutage fast überall im Leichtbau. Da das primäre Ziel die Optimierung von bestehenden Konstruktionen ist, haben Ingenieure, die über Millionen von Jahren entwickelte Taktiken der Pflanzen- und Tierwelt auf aktuelle Probleme übertragen. Im Top-Down Prozess haben Mitarbeiter von der Daimler AG 2005 den Kofferrisch und seinen Energieverbrauch näher untersucht. Sie entwickelten ein Auto nach dem Vorbild des Fisches hinsichtlich seiner strömungsgünstigen, wendigen und trotzdem stabilen Fortbewegungsart.

So konnten sie ein ressourceneffizientes Automobil mit geringem c_w -Wert, also mit geringem tatsächlichem Luftwiderstand konstruieren. [WOL19]

Der alte Zoologie-Hörsaal der Universität Freiburg ist dem Inneren von Knochen nachempfunden. Nicht nur der Architekt Hans-Dieter Heckeraus benutzte dieses Design, auch Maurice Koechlin, einer der Konstrukteure des Eiffelturms wandte diese Technik 1889 bei der Weltausstellung in Paris an. Beide Ingenieure verwendeten das Prinzip der isostatischen Rippen. Alle Rippen sind den gleichen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Dort wo viel Belastung auf das Material trifft, wird es passend verstärkt, Stellen mit wenig Belastung werden verkleinert bis ganz entfernt. [STO14] Das gleiche Prinzip wird auch bei der Topologieoptimierung verwendet. Hier werden Optimierungspotentiale mittels rechnergestützter Entwicklungen früh im Produktlebenszyklus erkannt. [BUR21]

Das Blatt der Riesenseerose *Victoria amazonica* (Abb. 1) kann durch die Querverstrebungen und Verästelungen bis zu 70 kg gleichmäßig verteilt auf der Blattoberseite mehrere Minuten halten. Das Prinzip wird bei Airbus bei einem Prototypenbau für Steuerungselemente wie Klappen und Spoiler angewandt. [STA15]

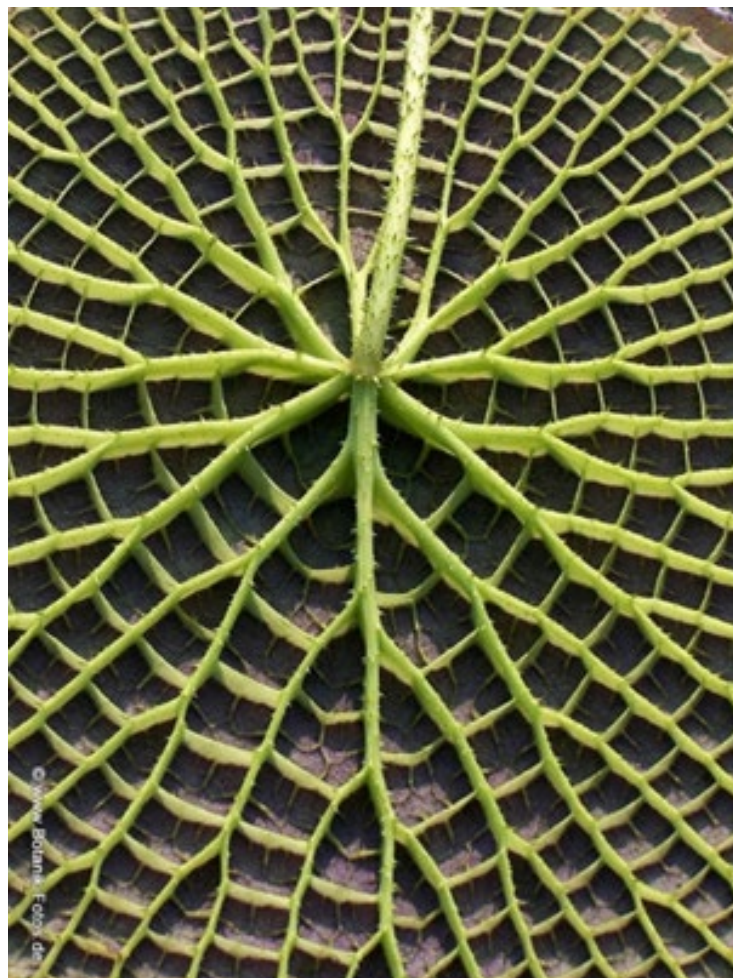


Abbildung 1 Rückseite einer Riesen-Seerose [NIC14] Zu sehen sind die starken Verästelungen, die für die hohe Flächenbelastbarkeit sorgen

Von Schildkröten und Bienen kennt man die typische hexagonale Struktur. In den 70er Jahren entdeckte Prof. Dr. Frank Mirtsch, dass dünnwandige Zylinder unter Druck selbst solche Wabenstrukturen ausbilden. Seitdem lassen sich formsteife und biegeelastische Bleche und Folien für vielfältige Anwendungsmöglichkeiten herstellen. Die Firma ThermHex Waben GmbH aus Halle nutzt zum Beispiel die Wabenstruktur in Verbindung mit der Sandwichbauweise, um Wabenkerne von 3 bis 30mm Dicke herzustellen. Laut Herstellerangaben können die Platten für Verkleidungen von LKW und Bussen, Wände für Fertigbäder oder Jachten verwendet werden. [THE15]

Neben all diesen Beispielen der technischen Biologie im Leichtbau wird besonders die Forschung und Entwicklung von Mikrodrohnen von Insekten inspiriert. So genannte Micro Air Vehicle (MAV) zeichnen sich durch ein Gewicht im Allgemeinen kleiner 100 g und eine Reynoldszahl zwischen 10^2 und 10^4 aus. [SCI21] Die Reynoldszahl beschreibt, ob die Fluidströmungen laminar oder turbulent vorliegen und gibt damit die Fließeigenschaften von Fluiden an. Im Falle der Mikrodrohne mit einer Reynoldszahl bis maximal 10^4 bedeutet das, dass der Flug der Drohne leichter von den vorliegenden Luftströmungen beeinflusst wird (Abb. 2). [SIM21]

Die MAVs können in drei Kategorien eingeteilt werden. Die schlagende Flügeltechnik, die starre Flügeltechnik und die rotierende Flügeltechnik. Es gibt bereits fliegende Nachbildungen mit schlagender Flügeltechnik von Bienen und Kolibris. [SCI21] Der entscheidende Unterschied bei beiden Tieren im Gegensatz zum Schmetterling ist die Schlagfrequenz der Flügel. Ein Kolibri schlägt bis zu 90 mal pro Sekunde, eine Biene sogar bis zu 200 mal pro Sekunde. [WET21][SCH21] Dagegen scheinen die 10 Schläge pro Sekunde eines Schmetterlings überaus träge. Allerdings erzeugt der Schmetterling durch seine zwei Flügelpaare und besondere Flügelbewegung andere aerodynamische Kräfte, die lange nicht wissenschaftlich erklärt werden konnten. [SCI21]

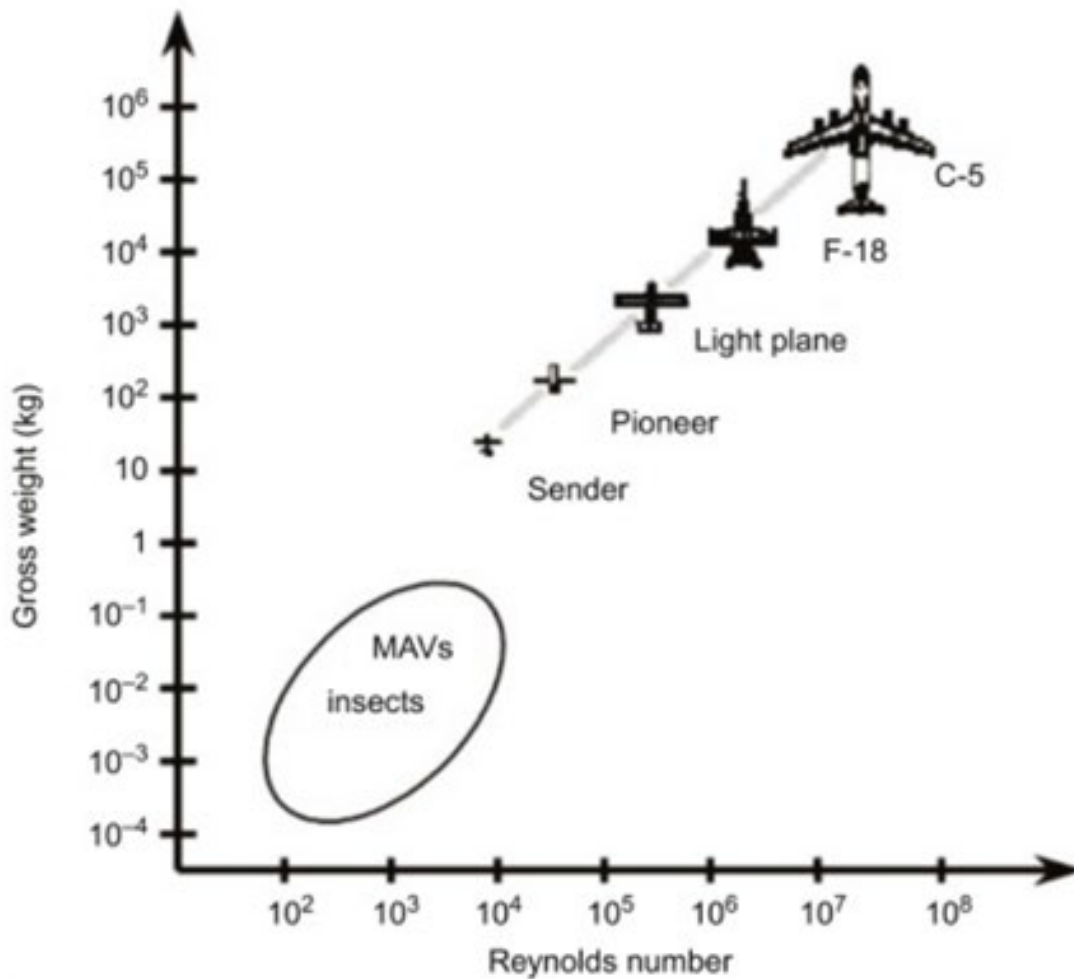


Abbildung 2 Vergleich der Reynoldszahl im Verhältnis zum Gewicht des Fluggerätes. Mikrodrohnen besitzen ungefähr die gleiche Reynoldszahl wie fliegende Insekten [SCI21] Im Graf zu sehen ist ein C-5, eins der größten Flugzeuge der Welt [ZWE19], ein Kampfflugzeug der Klasse F-18 [WIE20], ein Segelflieger, ein Pioneer als kleines Propellerflugzeug [PIO21] sowie ein Modellflugzeug

Der Markt von Mikrodrohnen wird weiter zunehmen. Sei es für den Hobbybereich für Flugwettbewerbe, Landwirtschaft für Luftaufnahmen der Agrarflächen oder für den militärischen Bereich. Es ist nun zu diskutieren, inwieweit der Schmetterling als Vorbild für den Bau von Mikrodrohnen dienen kann. Jede MAV-Kategorie hat seine eigenen Vorteile. So kann ein Starrflügler besonders schnell fliegen, Rotorflügler können sich gut im Schwebmodus halten. Es ist noch zu untersuchen, welche Vorteile eine Mikrodrohne mit schwingenden Flügeln und besonders aus welchem Material und mit welcher Konstruktion die besten Flugergebnisse erzielt werden können [KUR11].

4 Raupe – Schmetterling – Mikrodrohne

Es gibt drei wesentliche Merkmale, die ein Schmetterling in seinem Lebenszyklus ausweisen, die für den Leichtbau von Bedeutung sind. Die Seide, mit denen die Raupe ihren Kokon für die Metamorphose zum fliegenden Insekt verbringt, die Flügelstruktur, als stabiles, leichtes Flugmittel und die Aerodynamik des Schmetterlings während dem Flug.

Diese Aspekte lassen sich auf aktuelle technische Konstrukte übertragen und in Verbindung auf ein Flugobjekt führen, dass sich nicht nur durch sein leichtes Gewicht auszeichnet, sondern auch herausragende Manövrierfähigkeiten besitzt. Voraussetzung dafür ist allerdings die Entwicklung von Modellen hinsichtlich der aerodynamischen Kräfte, die auf das Fluggerät wirken und die Steuerung, die mittels geeigneter Programmierung und Elektrik realisiert werden muss. [KUR11]

Fliegen ist energetisch sehr teuer. Besonders wenn ein möglichst geringes Gewicht benötigt wird, scheiden große Energiespeicher aus. Zusätzlich macht es einen Unterschied, welcher Flugtyp verwendet werden soll. Beim bloßen Schweben auf der Stelle treten kleinere Auftriebsströme als beim Flug mit Geschwindigkeit auf. Ingenieure stehen vor der Herausforderung, die hohen Ansprüche moderner Drohnen auf neuartige Weise zu lösen. In den meisten Fällen entscheidet man sich für Starrflügel- und Drehflügelflugzeuge wie zum Beispiel Hubschrauber. Neben diesen Flugzeugtypen arbeiten immer mehr Forschergruppen an naturinspirierten Flügelschlag-Ornithoptern.[SCI21]

Der Nachteil bei einem konventionellen Passagierflugzeug ist die Inkompetenz auf der Stelle zu fliegen. Ein Hubschrauber hingegen kann auf der Stelle schweben, ist aber weniger effizient beim Geradeausfliegen. Beide Nachteile können durch Fluggeräte mit dem Vorbild an Tieren ausgeglichen werden. Im Besonderen ist der Schmetterlingsflug hinsichtlich seiner wirkenden aerodynamischen Kräfte lange Zeit unerforscht geblieben, weshalb es bisher nur Modelle von Fluggeräten mit Schmetterlingsvorbild und keine ausgereiften Drohnen gibt. [FLO15]

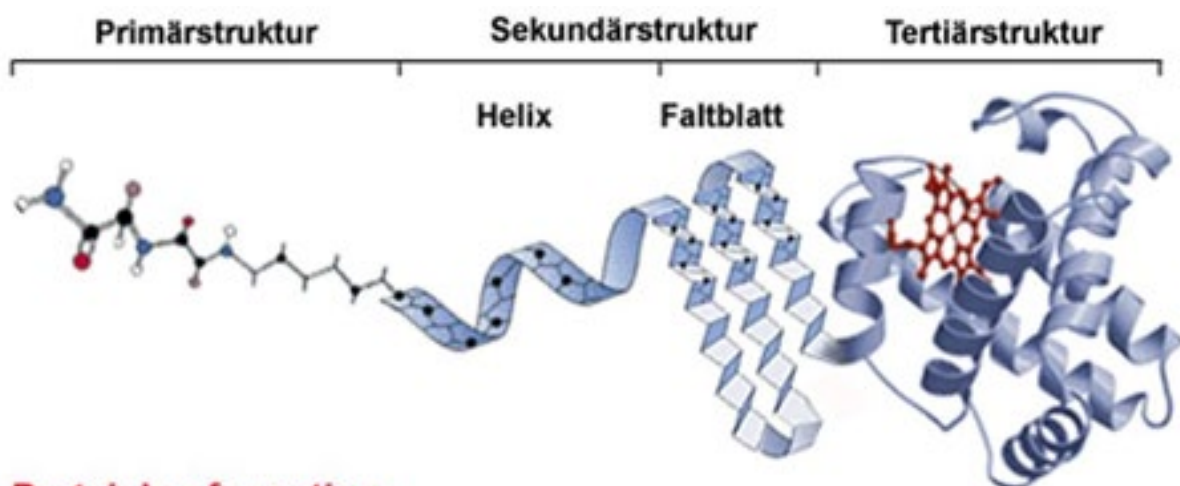
Nicht nur die Bestimmung der Flugart ist für eine Drohnenentwicklung von Bedeutung. Auch dem Drohnenbaumaterial wird eine entscheidende Bedeutung zugemessen. Die Anforderungen sind dabei klagestellt: möglichst geringe Dichte mit hoher Steifigkeit und Bruchzähigkeit. Diese Eigenschaften werden u.a. durch die Raupenseide abgedeckt. [GOS99]

5 Raupenseide

Um zu erläutern, wie die Seide einer Raupe auf den Leichtbau Einfluss nehmen kann, muss zuerst erklärt werden, wie Naturseide strukturell aufgebaut ist. Die Seide aus dem der *Bombyx mori* (Seidenspinner) sein Kokon für die Metamorphose spinnt, besteht aus 78 % Fibroin und zu 22 % aus Sericin. [SPE21]. Fibroin ist ein wasserunlösliches Faserprotein und gehört damit zu den Skleroproteinen, welche auch unter den Bezeichnungen Faserproteine, Gerüstproteine oder Strukturproteine bekannt sind.

Proteine setzen sich aus bis zu 21 verschiedenen Aminosäuren zusammen. Die Aminosäuren sind mit Peptidbindungen miteinander verbunden, wobei bei den Skleroproteinen die Peptidketten parallel zueinander geordnet sind und so die Struktur einer langen Faser bilden. [STU21]

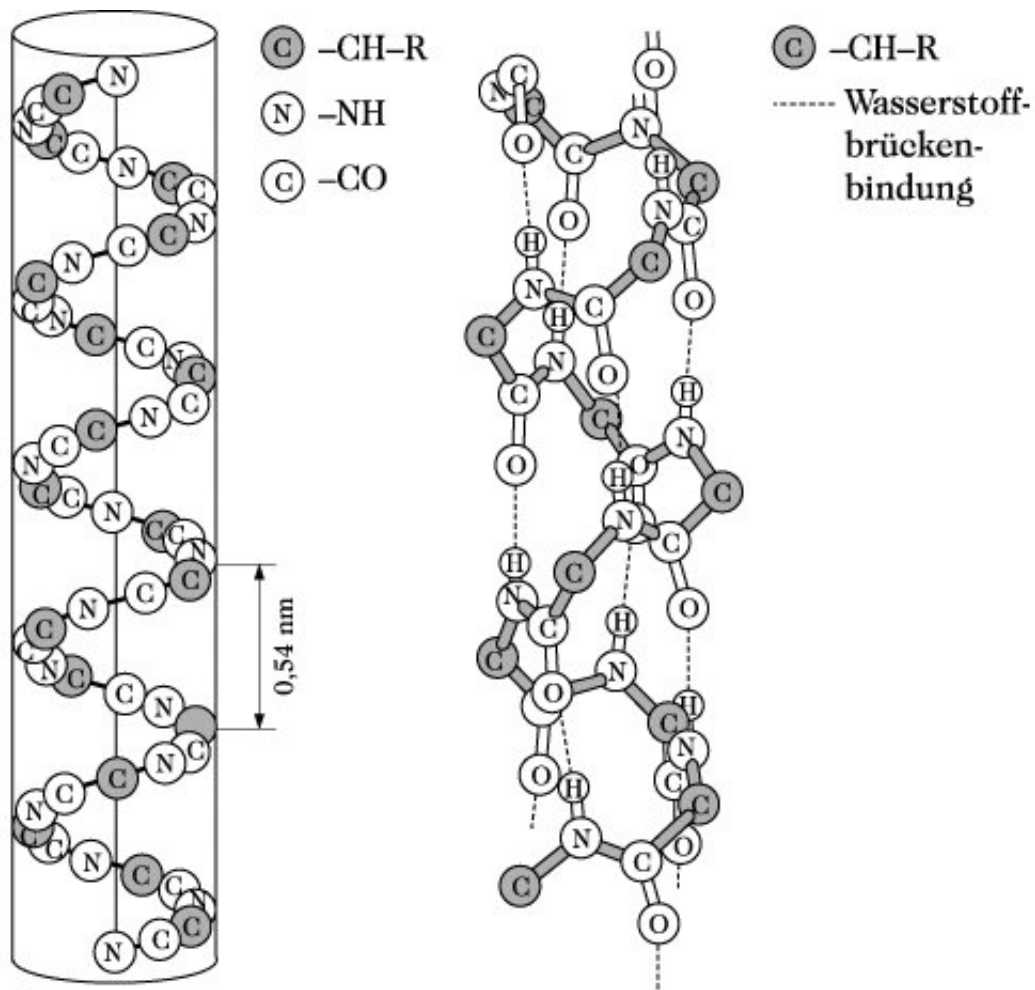
Der Aufbau eines Proteins unterteilt sich in Primär-, Sekundär-, Tertiär- und Quartärstruktur. Mit der Primärstruktur ist die Sequenz der miteinander verknüpften Aminosäurebausteine gemeint. Jedes Protein hat seine eigene Sequenz und somit auch andere Eigenschaften.



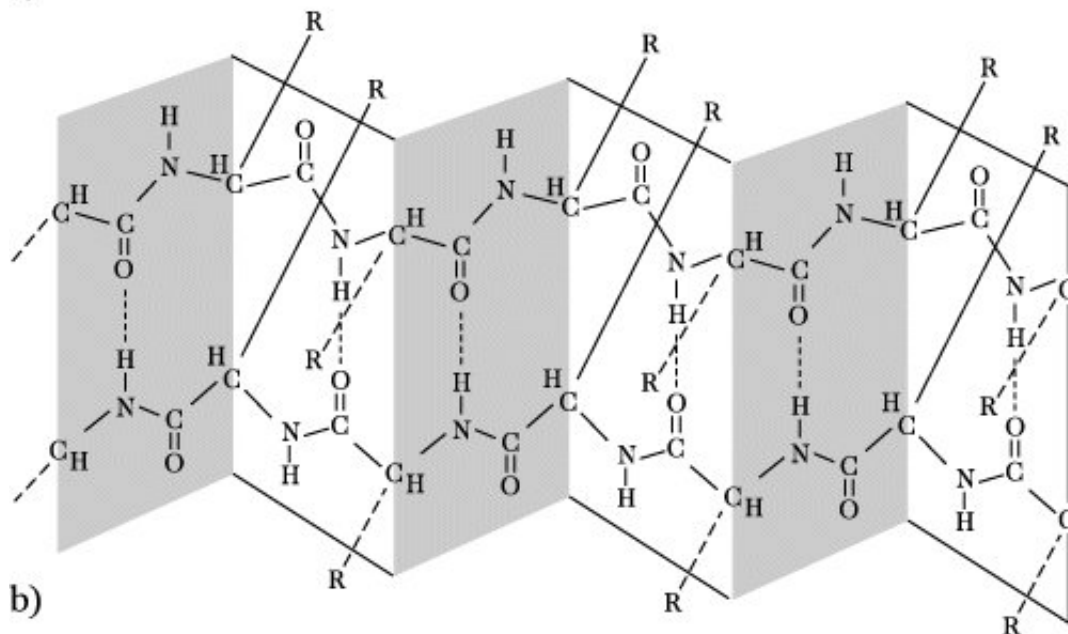
Proteinkonformation

Abbildung 3 Proteinstruktur aufgegliedert in Primärstruktur, Sekundärstruktur mit α -Helix und β -Falblattstruktur sowie die Tertiärstruktur [STU21]

Die Sekundärstruktur legt die räumliche Gestalt des Proteins fest. Es wird hier zwischen zwei Anordnungen unterschieden: In der α -Helix werden Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Carbonylsauerstoff- und Amidstickstoffatomen innerhalb einer Kette ausgebildet. Der Abstand zwischen zwei Windungen beträgt 0,54 nm mit 3,6 Aminosäurebausteine pro Windung. [DUD21] Bei der β -Struktur entstehen durch die intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen eine antiparallele Falblattstruktur. Das Fibroin als Hauptbestandteil von Seide besteht aus einer vollständigen Falblattstruktur. Das bedeutet, die Peptidbindungen liegen planar zueinander. Die dazwischenliegenden Kohlenstoffatome verbinden die Substituenten tetraedrisch. Es wird immer an den α -Kohlenstoffatomen gefaltet (Abb. 4). [SPR21]



a)



b)

Abbildung 4 Sekundärstruktur von Proteinen: (a) α -Helix, verbunden durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffatomen (b) antiparallele Faltblattstruktur [SPE21]

Tabelle 1 Übersicht der technischen Eigenschaften zwischen Seide und hochfester Stahl [GOS99]

Material	E-Modul [Nmm⁻²]	Bruchdeh- nung [%]	Zugfestigkeit [Nmm⁻²]	Bruchzähig- keit [MJm⁻³]	Dichte [gcm⁻³]
Seide der Bombyx mori	7000	18	600	70	1,3
Hochfester Stahl	200000	0,8	1500	6	7,85

In der Tertiärstruktur bestimmen van-der-Waals-Wechselwirkungen und Ionenbindungen die räumliche Anordnung. Die letzte Strukturebene sorgt für den Zusammenschluss von mehreren Proteinmolekülen durch zwischenmolekulare Wechselwirkungen.

Skleroproteine sind in Wasser und verdünnten Säuren unlöslich. Die Polypeptidketten sind entlang einer Dimension geordnet (Abb. 4b). Das Seidenfibroin- β -Keratin liegt in Faltblattstruktur vor und besitzt eine Länge zwischen 0,65 nm und 0,7 nm. [DUD21]

Der zweite Hauptbestandteil von Seide ist das Sericin. Dieses wird als Leim zur Stabilisierung des Kokons in den Drüsen der Raupe hergestellt. Damit die Raupe nicht von innen heraus verklebt, mischt sie Wasser unter das Sericin. Erst beim Herausdrücken der Seide am Kopf verdunstet das Wasser und die Proteine verketteten sich zu einem trockenen, festen Faden. [PLA19]

In Tabelle 1 wird ersichtlich, dass Seide ein wesentlich geringeres Gewicht als gewöhnlicher Stahl aufweist und dabei eine höhere Bruchzähigkeit mit sich bringt. Eine noch höhere Bruchzähigkeit ist aktuell bei Spinnenseide bekannt. Deren Bruchzähigkeit liegt bei 160 MJm⁻³ je nach Spinnen- und Faserart.

1884 wurde Kunstseide erfunden. Seit dieser Zeit gibt es unzählige Entwicklungen aus Acryl, PET oder Aramiden. [FOR14] Die Firma AMSilk GmbH aus Planegg/München entwickelte auf der Basis von Spinnenseide Biosteel. Das Material kann laut Hersteller in der Luftfahrt, Automobilindustrie, im Sport bis hin zu Brustimplantaten eingesetzt werden kann. Das Unternehmen wirbt mit einer Kombination aus Materialbelastbarkeit und Elastizität sowie einem Ultraleichtgewicht. [AMS21]

Das Material basiert, genauso wie das Naturprodukt, aus Proteinen. An der Universität Bayreuth wird das Protein mittels gentechnisch veränderten E.Coli-Bakterien hergestellt. Die dadurch gewonnene Spinnseiden-Lösung wird durch elektrische Felder verdampft und durch die elektrostatische Anziehung aus den entstehenden Tröpfchen ein Faden erstellt. [GRO15]

Wie bereits erwähnt besitzt Spinnseide eine höhere Bruchzähigkeit, Festigkeit und dabei eine geringe Dichte als Raupenseide. Um also den Biosteel zu optimieren und die mechanischen Eigenschaften der Spinnseide zu erlangen, muss die herkömmliche künstliche Seide verbessert werden. Die Steigerung der mechanischen Eigenschaften wird mit in Polymermatrizen eingebetteten Carbon-Nanoröhren realisiert. Durch die Einbettung können Zugfestigkeiten bis zu 1000 Nmm^{-2} und einer Zähigkeit nahe 1.000 Jg^{-1} erreicht werden.

Voraussetzung für die Verbindung von Nanoröhren und Biosteel war die Eigenschaften beider, sich im gleichen Lösungsmittel zu verbinden. Für die mechanischen Versuche wurde Biosteel in einem $75 \mu\text{m}$ dünnen Film auf einer Teflonplatte mit unterschiedlichen Nanoröhrenmassenanteilen vermischt. Nach dem Trocknen der fertigen Filmplatten wurde diese in Streifen mit $10 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm} \times 75 \mu\text{m}$ Größe geschnitten. Die durchschnittliche Länge der Nanoröhren beträgt $1 \mu\text{m}$. [BLO07]

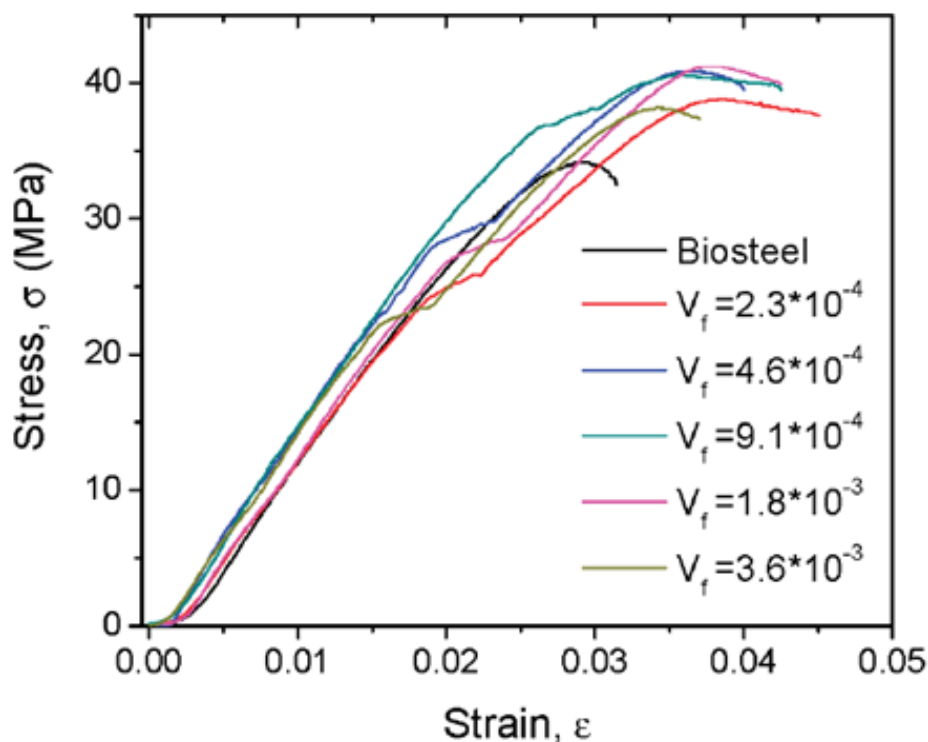


Abbildung 5 Spannungs-Dehnungsdiagramm für Lösungen mit unterschiedlichen Nanoröhrenmassenanteilen. Auf der x-Achse ist die Bruchdehnung, auf der y-Achse ist die Belastung, also die aufgebrachte Kraft im Verhältnis zur Querschnittsfläche der unbelasteten Probe aufgetragen. Ein Volumenanteil der Nanoröhren (V_f) erreicht bei $V_f = 2,3 \cdot 10^{-4}$ die größte Bruchdehnung [BLO07]

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der mechanischen Versuche zu sehen. Der Biosteel besitzt elastisches Verhalten bis ungefähr 2,5 % bis der Riss bei 3,1 % erfolgt. Biosteel mit einem Nanoröhrchenmassenanteil von $V_f = 1,8 \cdot 10^{-3}$ zeigen die höchsten Stresswerte, bei einem Anteil von $V_f = 2,3 \cdot 10^{-4}$ die größte Bruchdehnung. [BLO07]

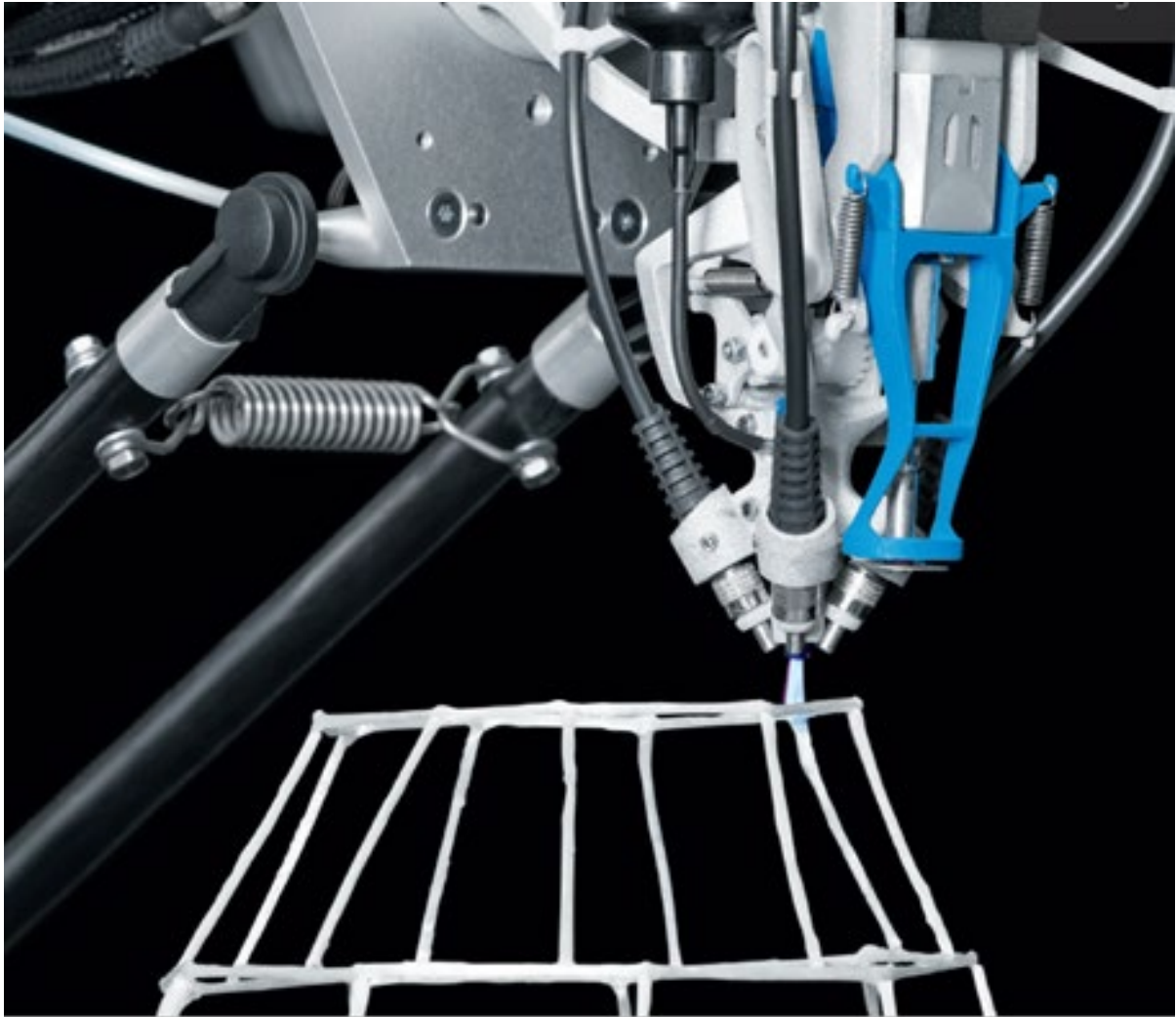


Abbildung 6 3D Cocooner der Fa. Fest [FRO16]. Zu sehen ist der Tripod als Handlingsystem und die angebrachte Seidendrüse, durch die das Material frei im Raum gespritzt wird

Was heutzutage alles aus künstlich hergestellter Seide machbar ist, zeigt die Firma Festo mit dem 3D Cocooner. Mittels einer Spindüse werden Glasfaserfäden gespritzt, die im Raum freie Gebilde erzeugen können. Bei der Technik ist der Vorteil, dass die Strukturen nicht wie bei dem herkömmlichen 3D-Druck schichtweise aufgebaut sind (Abb. 6) [FRO16]. Als Handlingsystem dient ein vertikal angebrachter Tripod vom Typ EXPT-45. Gemeint ist damit eine Art Hexapoden Stabwerksroboter mit einer sehr steifen Pyramidenstruktur für hohe Bahn- und Positioniergenauigkeit. Die Wiederholgenauigkeit bei der Robotersteuerung liegt bei $\pm 0,1$ mm mit einer absoluten Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm [FES21].

Am Toolcenterpoint des Hexapoden ist die Spinddüse angebracht. Der Glasfaserfaden mit 2 mm Durchmesser und 60 % Faservolumenanteil wird mit zähflüssigem Harz ummantelt und direkt nach Austritt mit UV-Licht ausgehärtet. Die Baugeschwindigkeit beläuft sich auf 10 mms^{-1} . Durch die Regulierung des UV-Lichtes ist es außerdem möglich, bestimmte Bereiche des Harzes temporär flüssig zu halten, um ein neues Teilstück an dieser Stelle zu fixieren. So ist der Aufbau von Strukturen frei im Raum möglich und ist nicht auf den schichtweisen Aufbau von Bauteilen angewiesen. Die eigens für diese Herstellungsweise programmierte Software überträgt nach Eingabe der Parameter wie Höhe, Breite und Verdrehung das Programm auf die Fahrwege des Hexapoden. [FRO16]

Laut Hersteller bildet diese Fertigungsart von Formen und Strukturen neue Dimensionen in der individuellen Produktgestaltung. Prototypen können auf diese Art hergestellt werden, ohne die sonst sehr aufwendige Kleinserienproduktion. Außerdem seien die Strukturen überaus zug- und biegefest, entsprechen damit den Eigenschaften der Naturraupenseide. [FRO16]

Flugobjekte wie Drohnen werden genau wie jedes andere Flugobjekt gesetzlich geregelt. Es gibt vom Bund eine Checkliste zum Thema Risikomanagement im Bezug zu Drohnenflug in Katastrophengebiete. Die „Ground Risk Class (GRC)“ kann allerdings auch auf den normalen Drohnenflug angewandt werden. Dabei bekommt die Drohne eine höhere Risikoklasse, je größer das Eigengewicht des Fluggerätes ist. Kleiner als 2 kg wird mit null Punkten bewertet und wird mit einem geringen Risiko für Personen am Boden bei einem eventuellen Absturz bewertet. Die Luftverkehrs-Ordnung legt in §21a (1) 1. fest, dass unbemannte Luftfahrtsysteme und Flugmodelle mit mehr als 5 kg einer offiziellen Erlaubnis bedürfen. [BUN19]

Allein aus diesem Grund ist der Leichtbau gefragt. Eine Drohne aus so leichtem Material wie Raupenseide, könnte das Eigengewicht einer handelsüblichen Beispieldrohne der Marke DJI mit einer diagonalen Länge von 302 mm und einem Gewicht von 570 g, deutlich senken. [DJI21] Das Hauptmaterial moderner, hochwertiger Drohnen ist der Verbundwerkstoff CFK. Dieser besitzt eine Dichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ und liegt damit $0,2 \text{ gcm}^{-3}$ über der Seide der Bombyx mori. Das mag im ersten Moment nicht viel sein, besonders da auch die Zugfestigkeit im vergleichbaren Bereich liegen. [REP21]

Trotzdem gilt es im Leichtbau, das Optimum aus der aktuellen Konstruktion hinsichtlich Gewichts und Bruchzähigkeit zu erreichen, was durch die reinen Messwerte bei der Raupenseide gegeben ist. Die Herstellung allerdings ist bei dem kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff schon ausgereift und Serienproduktion optimiert.

2011 erschien ein Artikel vom Massachusetts Institute of Technology über einen 3D gedruckten Ornithopter mit nachgestellten Insektenflügel. Darin wurde eine Mikrodrohne mittels einem CAD Modell und 3D-Druck hergestellt. Die Flügel besitzen eine Dicke von nur 40 μm in einem zweilagigen Material. Ein Flügel mit nur einer Druckschicht wäre zwar dünner, würde allerdings den Flugkräften nicht standhalten. Als Filament wurde Object FullCure 720 verwendet.

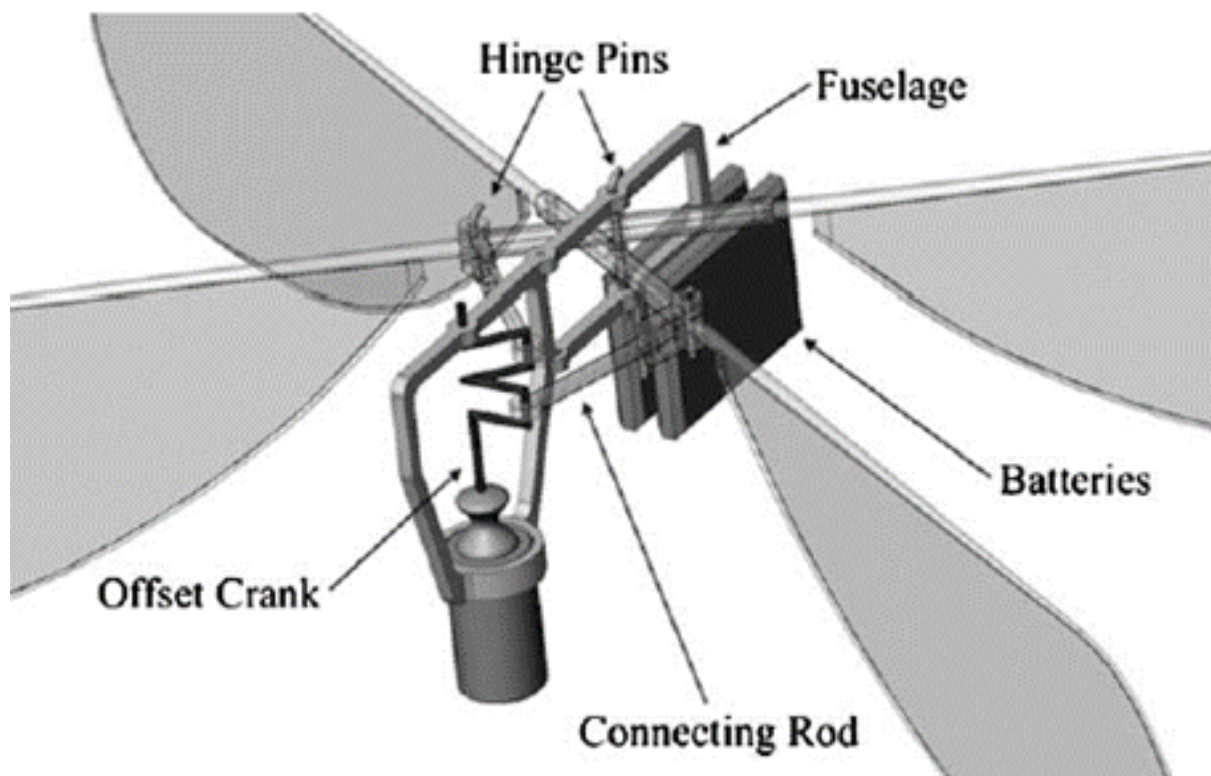


Abbildung 7 Großansicht des Ornithoptermechanismus [RIC11]

Ziel der Arbeit war es, eine Übersicht über die flexible und möglichst kurze Herstellung des Fluggerätes genauso wie Aufschlüsse über die Hauptabsturzgründe zu erlangen. Der fertige Insektennachbau konnte bei einem Gewicht von 3,89 g mit einem bestimmten Flügeldesign eine Flugdauer von 85 Sekunden beim Schwebflug erreichen. [RIC11]

Hauptgründe für die diversen Abstürze des Fluggeräts waren hauptsächlich die Batterie, der Motor und die Flügel. Für den Antrieb wurde ein GM 15 Motor mit 1,5 Watt verwendet. Der Antrieb von Solarbotics.com lief mit einem Gleichstromtriebemotor mit einer 25:1 Übersetzung. Als Batterie diente eine Lithiumpolymerbatterie mit 7,4 V. [RIC11]

Die Mikrodrohne hatte Probleme beim Flug, da das 3D gedruckte FullCure 720 Filament ohne jegliche Unterstützungsstrukturen im Flügel designt wurde (die Vorteile vom natürlichen Vorbild des Schmetterlingsflügels werden im Kapitel Flügelstruktur diskutiert). [ZAR13] Ohne die Stützstrukturen kommt das Filament bezüglich seiner Steifigkeit und seines Gewichts schnell zu konstruktiven Limitierungen. Die Bruchfestigkeit mit mehr als 2 kNmm^{-2} machen Seide zum idealen Werkstoff für Drohnen. Somit können diese noch gewichtssparender konstruiert werden, da weniger Verstärkungen für den Fall eines Absturzes berücksichtigt werden müssen. [SHE04]

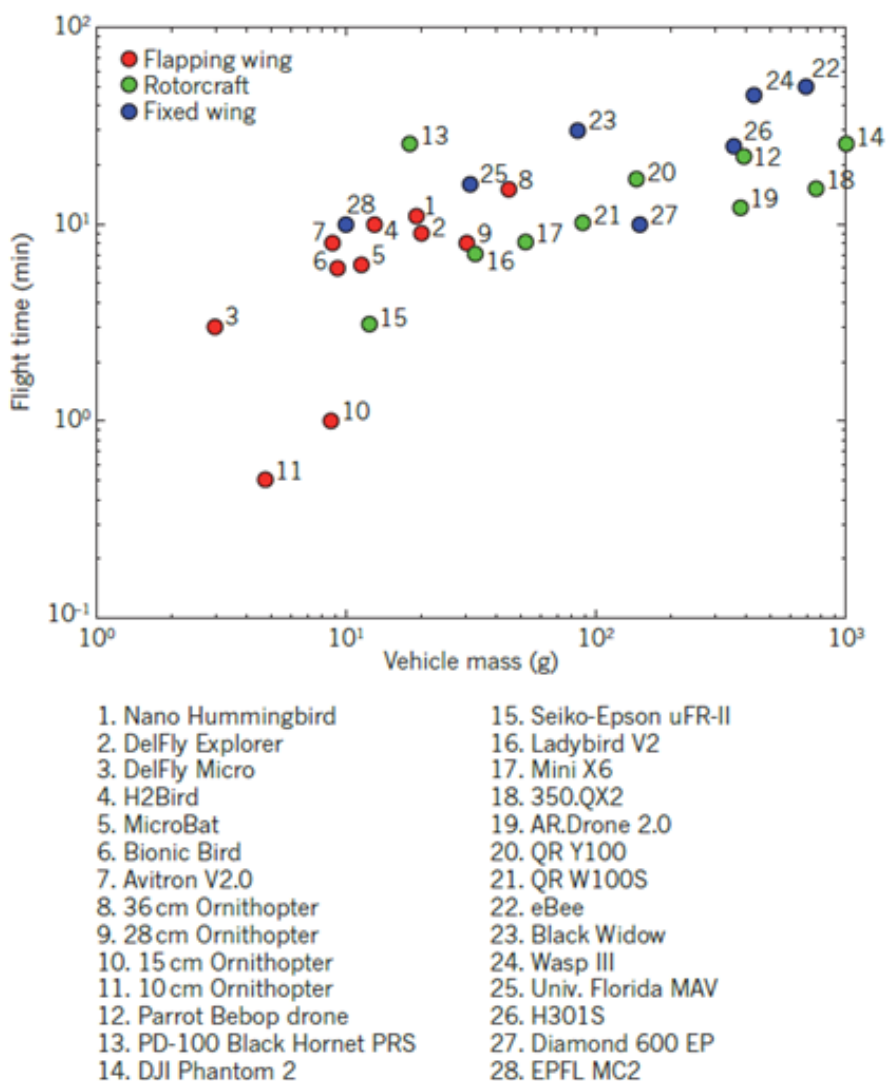


Abbildung 8 Verhältnis Flugzeit gegen Fluggerätmass [FLO15]. In Rot sind die flügel-schlagenden Drohnen aufgezeigt, in Grün die Rotorflügler und in Blau Drohnen mit starren Flügeln. Man erkennt, dass das Starr- und Rotorflügler die größten Massen aufweisen und die längsten Flugzeiten erreichen. Ornithopter halten sich eher in der Gewichtsklasse kleiner 30 g auf und erreichen aktuell keine längere Flugdauer als 11 Minuten

Abbildung 8 zeigt das Verhältnis von Flugdauer zu Fluggerätgewicht hinsichtlich Ornithoptern, Drehflüglern und Starrflüglern. Deutlich wird, dass die Ornithopter unter den leichtesten Fluggeräten zu finden sind, allerdings auch die Flugdauer abnimmt, je leichter das Fluggerät wird. Drohnen mit starren Flügeln bzw. Rotorblättern können hinsichtlich ihres Eigengewichtes minimiert und damit zu den MAVs optimiert werden, wenn die Konstruktion mit synthetischer Seide hergestellt werden würde. Eine Mikrodrohne darf laut der Defense Advanced Research Projects Agency nicht mehr als 100 g wiegen. [PET11]

Je nachdem wie weit das Gewicht durch die Seidenkonstruktion verringert werden kann, wird die Drohne nicht mehr für den Flug im Freien geeignet sein. Die Wettereinflüsse wären zu groß. Deswegen ist eine gewichtsreduzierte Mikrodrohne nur für den Innenbereich brauchbar. In einem Artikel der Nature Zeitschrift aus 2015 wird der Anwendungsbereich von Mikroornithoptern im Schwarm vorgeschlagen. Durch die simple Bauweise und kostengünstiges Material könnten die Drohnen im Schwarm Gebäude nach chemischen Gefahren mittels Sensoren untersuchen. [FLO15] Dennoch sind die in Abbildung 8 genannten Flugzeiten von Ornithoptern lange nicht ausreichend für praktische Anwendungen.

Es ist zu untersuchen, wieso Fluggeräte mit Flügelschlag im Verhältnis zu Drehflüglern und Starrflüglern eine so geringe Flugdauer aufweisen.

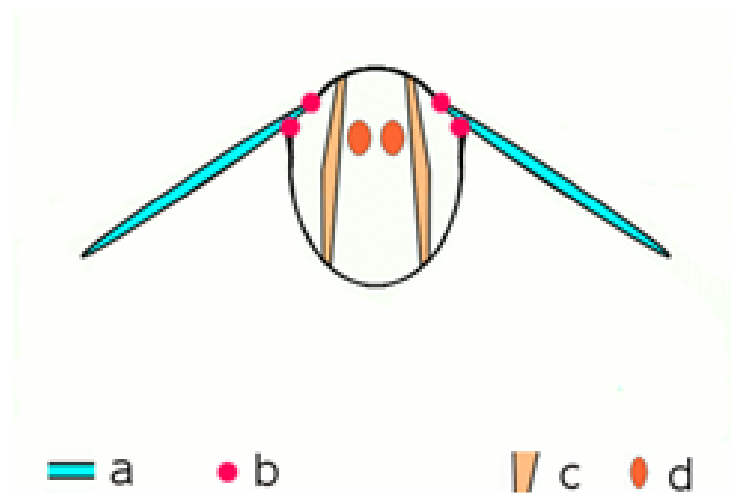
6 Schmetterlingsflug

Der Auftrieb beim konventionellen Passagierflugzeug wird nur durch Geschwindigkeit mittels Triebwerke oder Propeller erreicht. Verliert das Flugzeug an Geschwindigkeit, verliert es ab einem gewissen Wert, abhängig vom Gewicht und der Geometrie, auch an Höhe.[BOG15] Einem Schmetterling passiert das nicht. Er nutzt einen anderen Auftrieb, der keine Mindestgeschwindigkeit voraus geht. Nachfolgend wird der Schmetterlingsflug betrachtet und welche Möglichkeiten sich daraus ergeben, neuartige Fluggeräte zu erschaffen.

Schmetterlinge haben eine eigene Art und Weise zu fliegen. Ihr Flug richtet sich nicht entlang einer geraden Linie, wie zum Beispiel der Vogelflug, sondern ist zickzack gerichtet. Auf diese Art machen sie es Raubtieren schwerer, sie aus der Luft zu fangen.

Nicht nur die Art des Fliegens unterscheidet den Schmetterlings- vom Vogelflug. Anders als bei Vögeln wird der Flügelschlag nicht über Flugmuskeln realisiert, sondern indirekt von der Brustmuskulatur. Wenn sich die Muskeln im Thorax des Insekts vertikal zusammenziehen, werden die Flügel nach oben bewegt. Ziehen sie sich dagegen horizontal zusammen, werden die Muskeln im Brustkorb schmaler und länger, die Flügel bewegen sich nach unten. [SCH18]

a)



b)

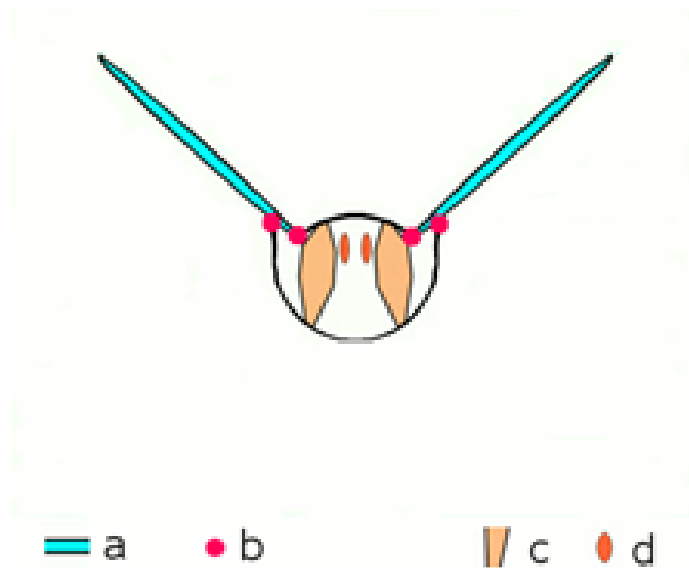


Abbildung 9 Schmetterlingsflügelschlag,

a) Aufwärtsbewegung des Flügels,

b) Abwärtsbewegung des Flügels,

a: Flügel, b: Flügelgelenke,

c: Muskulatur zwischen Bauch und Rücken (Corsoventralmuskeln),

d: Muskulatur parallel zum Thorax (Longitudinalmuskeln) [SCH18]

Zudem ist der Insektenflügel nicht mit Federn geschmückt, sondern besteht aus einer dünnen Doppelschicht aus Chitin. Die Beschaffenheit und Konstruktion des Flügels werden im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

Die Hintergründe, warum sich Schmetterlinge in der Luft halten können, blieben lang unerforscht.

Erst die Zeitlupenaufnahme macht die Bewegungen des Schmetterlings sichtbar: Kurz vor dem Start streckt das Insekt beide Flügel vertikal nach oben (Abb. 10 a). Wenn es dann vom Boden abhebt, beginnen die Flügel, im Gegensatz zu starren Strukturen, sich gleichmäßig in einer Welle nach unten zu bewegen. Diese Welle beginnt am oberen Ende der Flügel und setzt sich bis zur unteren Spitze fort (Clap and Peel Mechanismus), dadurch verändert sich der Anstellwinkel der Flügel, je nach Schlagstadium. [SCH18]

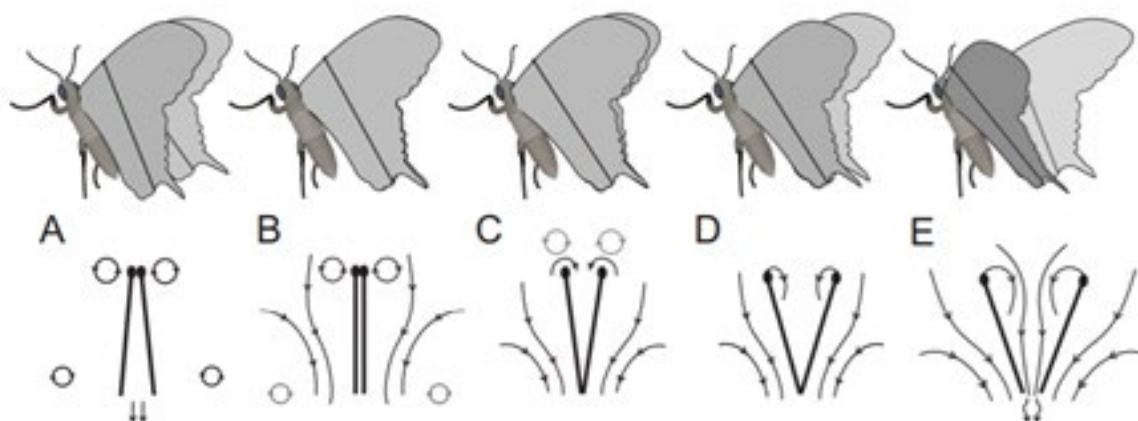


Abbildung 10 Clap and peel [ARM16]. Die Zeichnungen unterhalb der Schmetterlingsskizzen visualisieren die entstehenden Luftwirbel um die Flügel beim jeweiligen Abschlagstadium

Durch die Abwärtsbewegung entsteht ein Unterdruck zwischen den Flügeln welcher Luft von oben anzieht. Weiter entstehen an den langen Kanten der Flügel Luftwirbel, die dem Schmetterling einen Aufwärtsschub geben.

Neben der Flügelbewegung wiegt der gesamte Thorax beim Flügelschlag vor und zurück. Bei der Abwärtsbewegung der Flügel ist der Körper vorn über gebeugt, bei der Aufwärtsbewegung der Flügel lehnt sich der Schmetterling zurück. Dies gilt als Vorbereitung für die nächste Flügelbewegung, in der die Spitzen des vorderen Flügelpaares sich nach oben ziehen. Durch das Vornüberbeugen des Thorax haben dann die Flügel trotz des Kräuselns noch einen positiven Winkel und unterstützen den vertikalen Auftrieb des anfänglich abwärts gerichteten Flügelschlages. [ARM16]

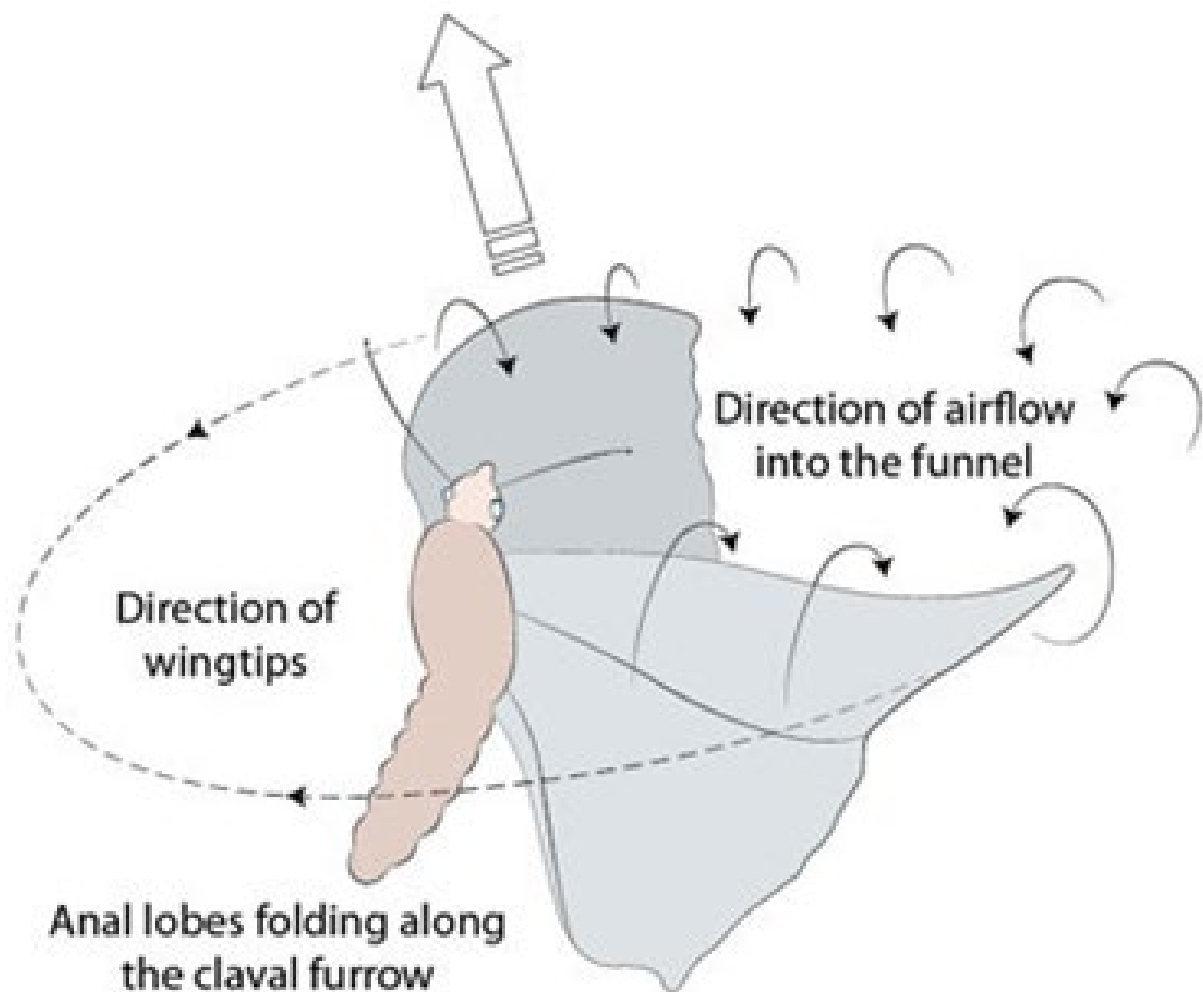


Abbildung 11 Entstehende Luftwirbel durch die Abwärtsbewegung der Flügel [CLA13]. Die Luftströme des Flügels verwirbeln an den oberen Kanten und umströmen die Flügelflächen. Bei der Hälfte des Flugabschlages drehen sich die Flügelspitzen nach hinten, um für den Aufschlag in der richtigen Position zu sein

Nicht nur das vordere Flügelpaar bekommt eine wichtige Bedeutung für den Schmetterlingsflug. Beim näheren Betrachten des entstehenden Unterdrucks bei der Abwärtsbewegung sollte auch Luft hinter dem Schmetterling angesaugt werden. Das würde dem Aufwärtsflug allerdings erheblich beeinträchtigen. Aus diesem Grund besitzt der Schmetterling nicht nur flexible Vorderflügel, sondern auch ein Paar flexible Hinterflügel. Diese fungieren durch die Verbindung mit dem Bauch als Ventil, das einen rückläufigen Luftstrom verhindert. Mit starrem Flügel wäre diese Abdichtung nicht möglich. [CLA13]

Der Schmetterlingsflug sieht für den außenstehenden Beobachter ungerichtet und willkürlich aus. Tatsächlich haben Wissenschaftler von der Universität in Oxford herausgefunden, dass Schmetterlinge auf ein weites Spektrum an aerodynamischen Mechanismen zurückgreifen,

während sie abheben, manövrieren, sich in der Luft auf der Stelle halten oder zur Landung ansetzen. [SRY02]

Die Forscher R.B. Srygley und A. L. R. Thomas fassten 2002 in einem Artikel in der Nature Zeitschrift ihre Erkenntnisse zum Schmetterlingsflug zusammen. Sie fanden heraus, dass die entstehenden Luftwirbel am Rand des oberen Flügelpaares nicht konisch verlaufen, wie aus vorherigen Vermutungen anzunehmen war, sondern dass sich die Wirbel mit fast konstantem Durchmesser vom Thorax aus bis zu Ende der Flügelspitzen ausbreiten (**Abb. 12**).

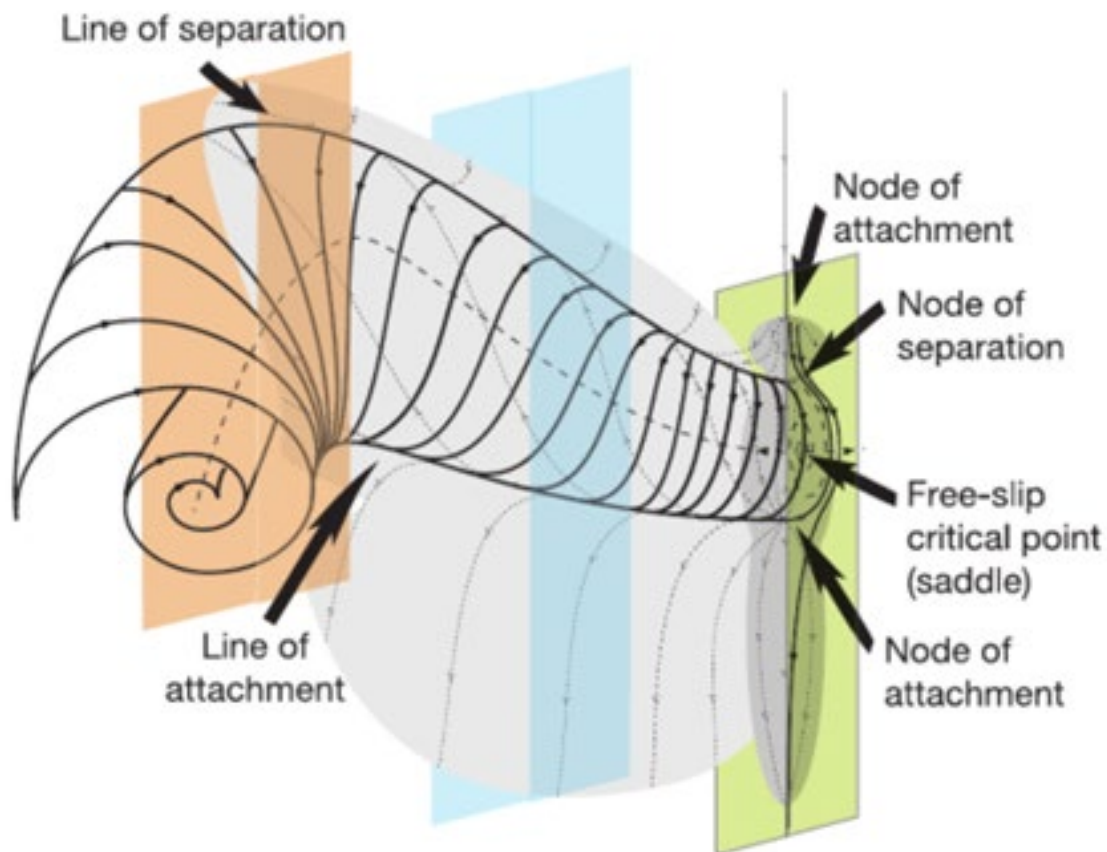


Abbildung 12 Ausbreitung der Luftwirbel vom Thorax aus bis an die Flügelspitzen [SRY02]
Die Luftwirbel verlaufen fast parallel entlang der oberen Flügelkante

Die Luftwirbel entstehen bei Beginn der Abwärtsbewegung der Flügel und werden von den Insekten besonders zum Manövrieren und Aufsteigen in die Luft verwendet.

Es hat viele Jahre gedauert, bis Forscher die tatsächlichen Wirbelströme um die Flügel herum beschrieben haben. Die Vorteile gegenüber dem bisher bekannten Flugzeug liegen allerdings auf der Hand: In der Luft auf der Stelle zu stehen, auf engstem Raum zu manövrieren und dabei so energiesparend wie möglich von einem Ort zum anderen zu gelangen. [SRY02]

Die Firma Festo hat mit den eMotionButterflies eine ultraleichte flugfähige Nachbildung echter Schmetterlinge entwickelt. Durch hoch-integrierte On-Board-Elektronik werden die Flügel

individuell angesteuert und stabiles Fliegen möglich gemacht. Neben dem Clap-and-Peel Mechanismus für den Auftrieb, wurde weiterhin ein autonomes Bewegen im Raum programmiert. Durch Funk- und Sensortechnologie am Schmetterling in Verbindung mit Indoor-GPS und einem Kamerasystemen welches 160 Mal in der Sekunde die Position bestimmt, wird ein kollisionsfreier Flug bei mehreren Flugobjekten möglich. [FRO15]

Die Schmetterlinge weisen eine Spannweite von 500 mm, ein Gewicht von 38 g und eine Schlagfrequenz bis zu 2Hz auf. Damit besitzen sie eine 85% Schlagreduzierung gegenüber herkömmlichen Schmetterlingen. Wenn man die durchschnittliche Größe eines in Deutschland heimischen Zitronenfalters mit bis zu 55mm Flügelspannweite und einem Gewicht von 12 g heranzieht, macht das ein Verhältnis von 1:4,5 beim Schmetterling und beim eMotionButterfly von 1:13. [KÜN21]



Abbildung 13 eMotionButterflies der Firma Festo [FRO15]

Das primäre Ziel bei der Entwicklung galt vorrangig nicht der Umsetzung des Schmetterlingsfluges in den Leichtbau, sondern der kollisionsfreien Bewegung im dreidimensionalen Raum. Die Kommunikation der Flugobjekte wird über einen zentralen Leitreechner gesteuert und in Echtzeit an die eMotionButterflies weitergeleitet. [FRO15]

Forscher aus der Universität in Delft in Niederlanden haben in Kooperation mit der portugiesischen Air Force Academy 2016 ein aerodynamisches Modell einer Clap-and-Peel Mikrodrohne gearbeitet, die das Schwingflügelprinzip verwendet und damit zu den Ornithoptern, also zu

Schwingerflugzeugen, zählt. Da die Definition des Ornithopters sich aus der Flügelbewegung ergibt, verändert sich der Winkel der Flügel dauerhaft während dem Flug. Die Berechnung der aerodynamischen Kräfte kann deswegen nicht analog eines Flugzeuges geschehen. Ziel der Forschung war ein Computermodell zu etablieren, dass die Berechnung der auftretenden aerodynamischen Kräfte realitätsnah kalkulieren kann. [ARM16]

Das niederländische Team entschied sich bei ihrer Versuchsanordnung für das vier-Flügel-Prinzip. Als Gründe wurden die größere mögliche Traglast im Vergleich zu einem einzigen Flügelpaar und die reduzierte Komplexität mit zwei Freiheitsgraden pro Flügel genannt. Bei nur insgesamt zwei Flügeln, wäre eine viel umfangreichere Steuerung der Flügelbewegung notwendig, um die Lenkung zu realisieren. Des Weiteren können die Schwingungen, welche unweigerlich durch die Auf- und Abwärtsbewegung entstehen vom anderen Flügelpaar ausgeglichen werden. Als letzter Grund setzten die Forscher die allgemeine Stabilität des Fluggerätes an, welche durch ein Heck realisiert werden kann. [ARM16]



Abbildung 14 Flapping-Wing Mikrodrohne aus den Niederlanden [ARM16]

Die genauen Abmessungen der Flügel sind in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2 Flügelabmessung der Flapping-Wing Mikrodrohne [ARM16]

Gewicht [g]	0,29
Spannweite [mm]	274
Root chord (Breite des Flügels am Rumpf) [mm]	85
Tip chord (Breite des Flügels am äußeren Ende) [mm]	56

Das Fluggerät wurde für eine Schlagfrequenz von 10 bis 14 Hz konstruiert. Die Flügel bestehen aus Mylarfolie mit dünnen Carbonstäben als Vorderkantenunterstützung und Versteifungen. [ARM16]

Mylarfolie ist ein flexibles, festes und widerstandsfähiges Material aus Polyethylenterephthalat (PET). Eigenschaften sind u.a. hohe mechanische Stabilität, alterungs- und chemische Beständigkeit und es kann als elektrischer Isolator verwendet werden. Das Gewicht beläuft sich auf 11 gm^{-2} bei einer Dichte von $1,38 \text{ gcm}^{-3}$. [CHE21] 1961 bestand der von der NASA gestartete „Echo“-Satellit aus einer 0,127 mm dicken, metallbeschichteten Mylarfolie. [LUM21] Das breite Heck besteht aus Gründen der Stabilität Sichtbarkeit aus Styropor.

Das Material Styropor wurde erstmals 1951 von der Fa BASF SE im Jahr 1949 von Fritz Stastny im Labor der damaligen Badischen Anilin- und Sodafabrik entdeckt. Durch ein Versäumnis ließ er eine Schuhcremedose gefüllt mit Lösung aus Polystyrol in Monostyrol, Benzoylperoxid als Katalysator und Petroläther als Treibmittel für eineinhalb Monate im Trockenschrank. Als er es herausnahm, war Styropor geboren, auch wenn dem Forscher seine damalige Entdeckung noch fremd war. [BAS21] Heutzutage besitzt die Firma BASF kein Patent mehr auf das Produkt, weshalb es diverse Arten von Styropor gibt. Im Durchschnitt zeichnet sich das Material aber durch eine geringe Wärmeleitfähigkeit (im Mittel $0,034 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), ein E-Modul von bis zu 22000 kPa und ein Gewicht im aufgeschäumten Zustand von 20 kgm^{-3} bis 90 kgm^{-3} je nach Verwendungszweck aus. [LUM21]

Das Testfluggerät wurde in einem Windtunnel und im freien Flug mittels mehrerer Sensoren überwacht und die Bewegungen mit dem Computermodell verglichen. Ziel war es, das zuvor überarbeitete quasi-stabile aerodynamische Modell als Berechnungsgrundlage experimentell mit den tatsächlichen Bewegungen der Clap-and-Peel Mikrodrohne zu verifizieren.

Das Computermodell, welches die Forscher etabliert haben, kann als Grundlage für weitere Entwicklung von Fluggeräten dienen. [ARM16]

Ein Forscherteam von der Harvard Universität in den USA haben in Zusammenarbeit mit der Universität aus Tokyo den Flug des Schwalbenschwanzschmetterlings näher untersucht. Dieser Schmetterling zeichnet sich durch eine relativ zum Schmetterlingsdurchschnitt große Flügeloberflächen aus. Dadurch überlappt das vordere Flügelpaar das hintere und der Schmetterling wird in der Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Es verändert sich also der Anstellwinkel der Flügel, welcher für den Auftrieb des Insekts wichtig zu kontrollieren ist. Die Forscher wollten beweisen, dass der Flug des Schwalbenschwanzschmetterlings durch simples Auf- und Abschlagen der Flügel, ohne den Anstellwinkel zu korrigieren möglich sei. [TAN10]

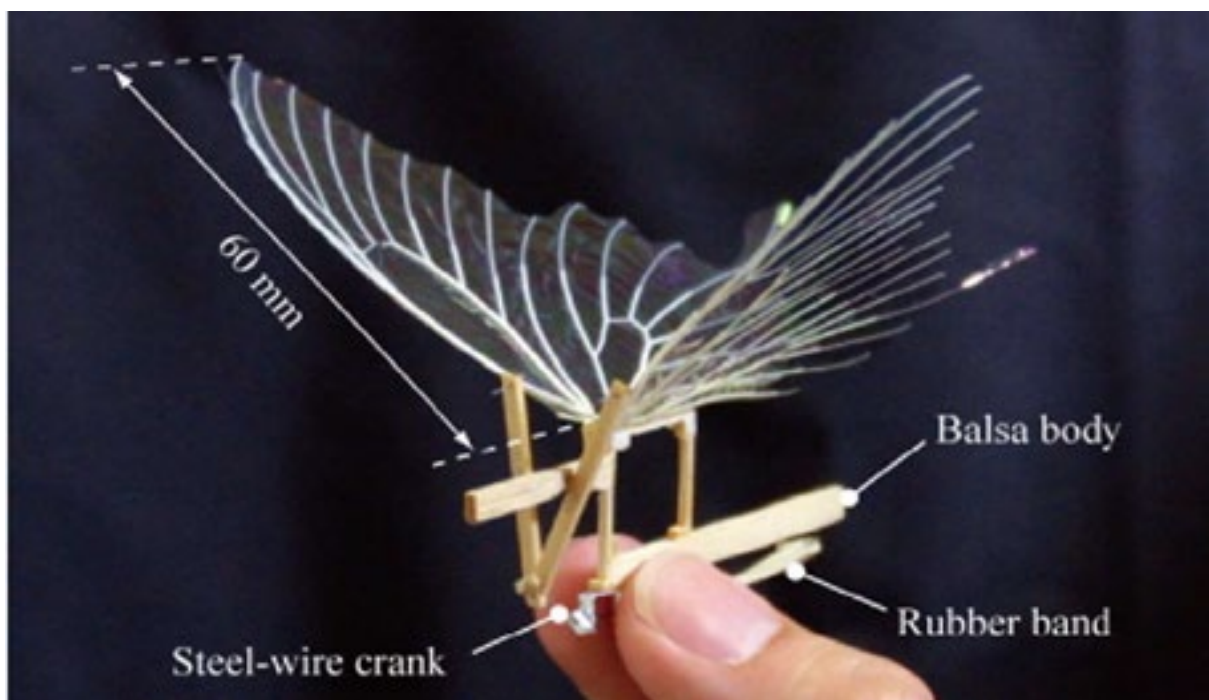


Abbildung 15 Schwanzloser Ornithopter nach dem Schwalbenschwanzschmetterling nachempfunden [TAN10]

Begünstigt wird das Auftriebsprinzip von der wellenförmigen Körperbewegung des Insekts. Die Ergebnisse zeigten weiterhin, dass der Luftwiderstand mit Zunahme der Wellenbewegung gleichermaßen größer wurde, jedoch der Auftrieb trotzdem groß genug ist, um den Schub nach vorne zu halten.

Der Schlusssatz des Beitrages, war die Weiterverwendung der Ergebnisse auf zukünftige aerodynamische Systeme. [TAN10]

Bei der kritischen Betrachtung der Bewegungsabläufe des Schwalbenschwanzschmetterlings in Bezug auf ultraleichtgebaute Fluggeräte, kommt diese Flügelschlagtechnik allerdings nur zweitrangig in Frage. Aus der Studienarbeit wird deutlich, dass sich der Körper des Insektes bei jedem Flügelschlag zwischen 0° und 40° nach vorne und wieder nach hinten beugt. Je nachdem für welchen Anwendungszweck die Drohne gebaut ist, wird die Kippbewegung

problematisch. Kameraaufnahmen werden nur schwer klare Bilder erzeugen, für bestimmte Sensortechnik wiederum ist das Wackeln irrelevant.

Forscher aus Japan bauten eine Drohne (butterfly-type ornithopter BTO), um die Luftzirkulation um den Schmetterling herum zu beobachten. [TAN08]

Dafür bauten sie einen dem Schmetterling nachempfundenen Ornithopter. Im Gegensatz zum echten Insekt bestehen die Flügel nicht aus Chitin, sondern aus Polyurethanvenen und Papiermembranen.

Typische Eigenschaften vom Schmetterlingsflug ist die niedrige Schlagfrequenz und eine geringe Flächenbelastung der Flügel. Die Flächenbelastung von Schmetterlingsflügeln liegt bei 1 Nm^{-2} .

Die Nachbildung befand sich genau im Verhältnis zwischen Schlagfrequenz der Flügel und Flächenbelastung wie ein normaler Schmetterling (Abb. 16). [TAN08]

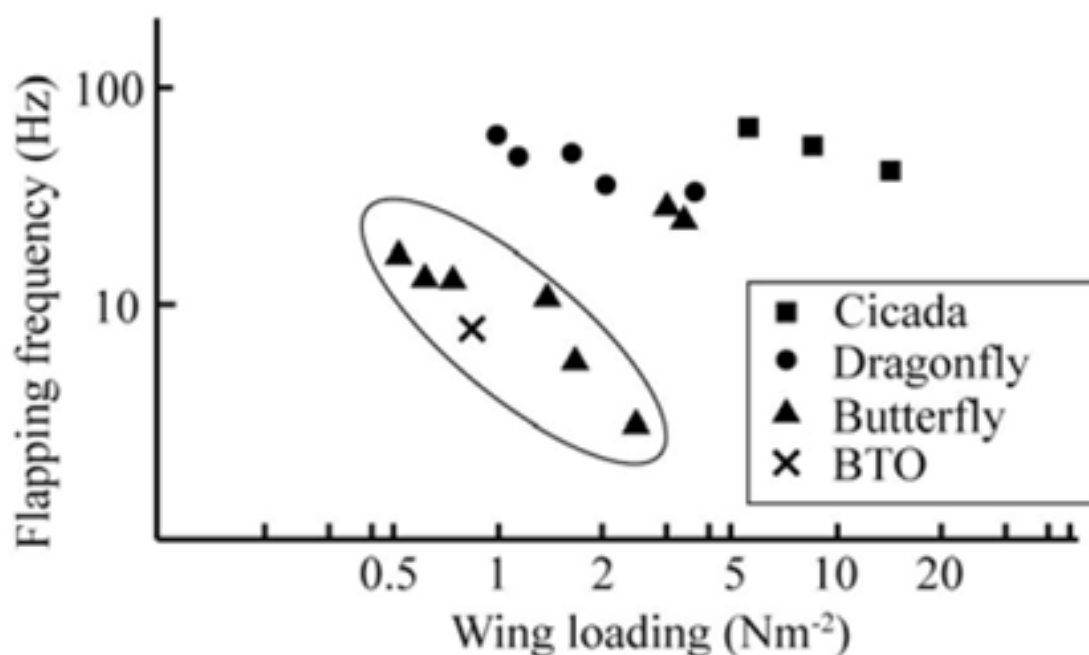


Abbildung 16 Verhältnis zwischen Flügelflächenbelastung und Schlagfrequenz von Insekten im Vergleich zum Butterfly-type Ornithopter (BTO) [TAN08]. Die größte Flächenbelastung besitzt die Zikade. Der Ornithopter weist das gleiche Verhältnis von Flügelflächenbelastung zu Schlagfrequenz wie sein natürliches Vorbild auf

Beim Design eines Fluggerätes wird bei den aerodynamischen Kräften, die auf die Flügel wirken zwischen der Auftriebskraft und der Widerstandskraft unterschieden. Die Auftriebskraft richtet sich senkrecht zur Strömung, die Widerstandskraft verläuft parallel dazu. Die aerodynamische Kraft wird vom Anstellwinkel der Flügel bestimmt.

Aber auch dieses Forschungsteam gelang zu dem Ergebnis, dass der Ornithopter im Freiflug erheblichen Rumpfschwankungen ausgesetzt ist (Abb. 17).

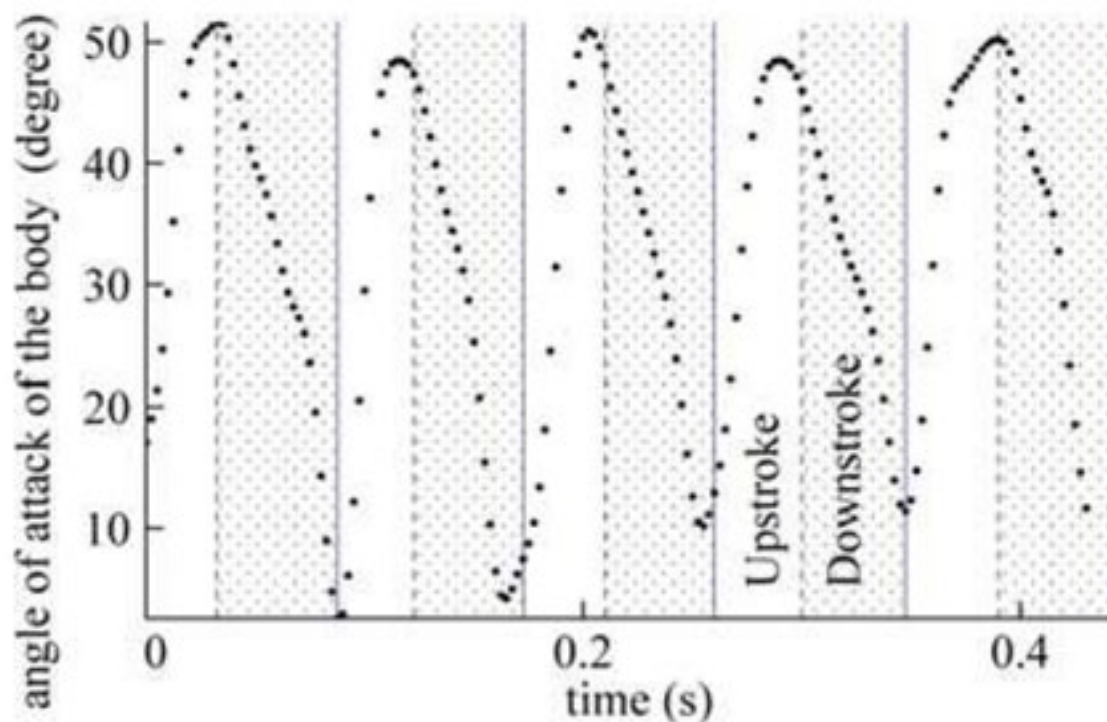


Abbildung 17 Anstellwinkel des Ornithopterrumpfes im Freiflug in einem Windtunnel [TAN08]. Bei jedem Auf- und Abschlag verändert sich der Anstellwinkel des Rumpfes zwischen 0° und 50°

Neben der Flugneigung ist noch zu klären, wie der Energiebedarf einer Schmetterlingsdrohne im Vergleich zu Drehflüglern bzw. Starrflüglern ist.

Die Beispieldrohne Mavic Air 2, die schon zum Gewichtsvergleich verwendet wurde, ist mit einer Flugzeit bei Windstille mit 34 Minuten angegeben. Für die Energiebereitstellung ist ein 198 g schwerer Akku mit einer Kapazität von 3.500 mAh und einer Spannung von 11,55 V eingebaut. [DJI21]

Für kleinere Fluggeräte sind keine wissenschaftlichen Daten für den Energieverbrauch aufgezeichnet bzw. nicht auffindbar. Aktuell gibt es ein Patent beim deutschen Patent- und Markenamt, dass 2016 aus Russland angemeldet wurde. Hier wird eine neuartige Flügelkonstruktion mit gelenkig zusammenlaufenden Knoten konstruiert. So sollen die Summe der aerodynamischen Kräfte beider Flügelseiten ungefähr ausgeglichen werden und damit der Energieverbrauch zur Steuerung gesenkt werden. Allerdings ist auch hier die einzige Angabe, dass die Antriebseinheit ein linear elektromagnetischer Aktor ist, ohne Hinweis auf den tatsächlichen Energieverbrauch. Des Weiteren ist dieses Patent auf ein Personenfluggerät ausgelegt, mit Kabine für einen Piloten. [VAL16]

Ein Ingenieur aus Dresden hat 2010 seinen Ornithopter HE209 vorgestellt. Das Modell hat laut eigenen Angaben die mögliche Effizienz von Propellerflugzeugen verdoppelt. Bisher erschien nur ein Artikel über die flugfähige Drohne, was eine Verifizierung der Ergebnisse schwer macht. [PFÄ10]

Weitaus fundierter ist die Arbeit von Entwicklern der Universität in Delft, welche am Micro Air Vehicles Laboratory 2018 geschrieben wurde. Hier wurde eine programmierbare, frei fliegende Drohne nach dem Vorbild von Insekten gebaut. Dabei wird die Position und Orientierung in der Luft ausschließlich durch die Flügelbewegung gesteuert. [KAR18]

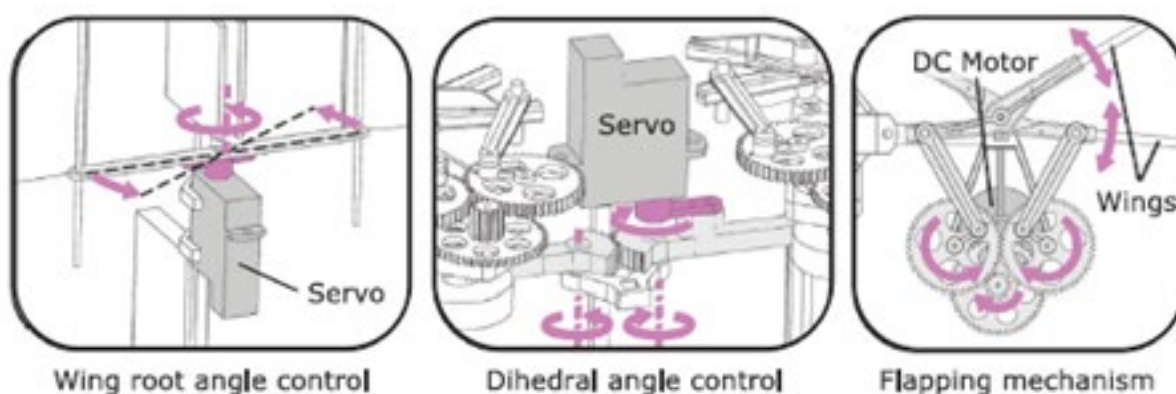


Abbildung 18 Detailanzeige des Drohnendesigns, a) Flügelmechanismus zur Gierdrehmomentregelung, b) Flügelmechanismus zur Nickdrehmomentregelung, c) Schlagmechanismus zur Steuerung des Schub- und Rolldrehmoments [KAR18]

Die Größe der Drohne sowie die Flügelkinematik sind keinem bestimmten Tier nachempfunden, sondern vielmehr für maximale Energieeffizienz mit einem bürstenlosen Gleichstrommotor optimiert. Die fertige Drohne besitzt ein Gewicht von 28,2 g mit einer Flügelspanne von 330 mm. Die 140 mm langen Flügel schlagen mit ungefähr 17 Hz im Schwebemodus. Laut eigenen Angaben kann die Drohne 5 Minuten im Schwebflug ausharren, bzw. 1000 m weit fliegen, bevor die Energie der Batterie für den Antrieb nicht mehr ausreicht. Im geraden Flug können Geschwindigkeiten bis 7 ms^{-1} erreicht werden, dagegen liegt die energieeffizienteste Geschwindigkeit im geraden Flug bei 3 ms^{-1} . Die maximale Geschwindigkeit im seitlichen Flug liegt bei 4 ms^{-1} .

Für die Orientierungskontrolle während dem Flug steuert die Drohne, ähnlich wie eine Fruchtfliege, den Anstellwinkel der Flügelwurzel. Wie viele andere Insekten, kann die Drohne vier Freiheitsgrade kontrollieren. Mittels Giermoment, Nickmoment und Rollmoment wird die Orientierung im Raum gesteuert (Abb. 19). Beim Flug lehnt sich also die Drohne in die Richtung, in die sie auch fliegen möchte. [KAR18]

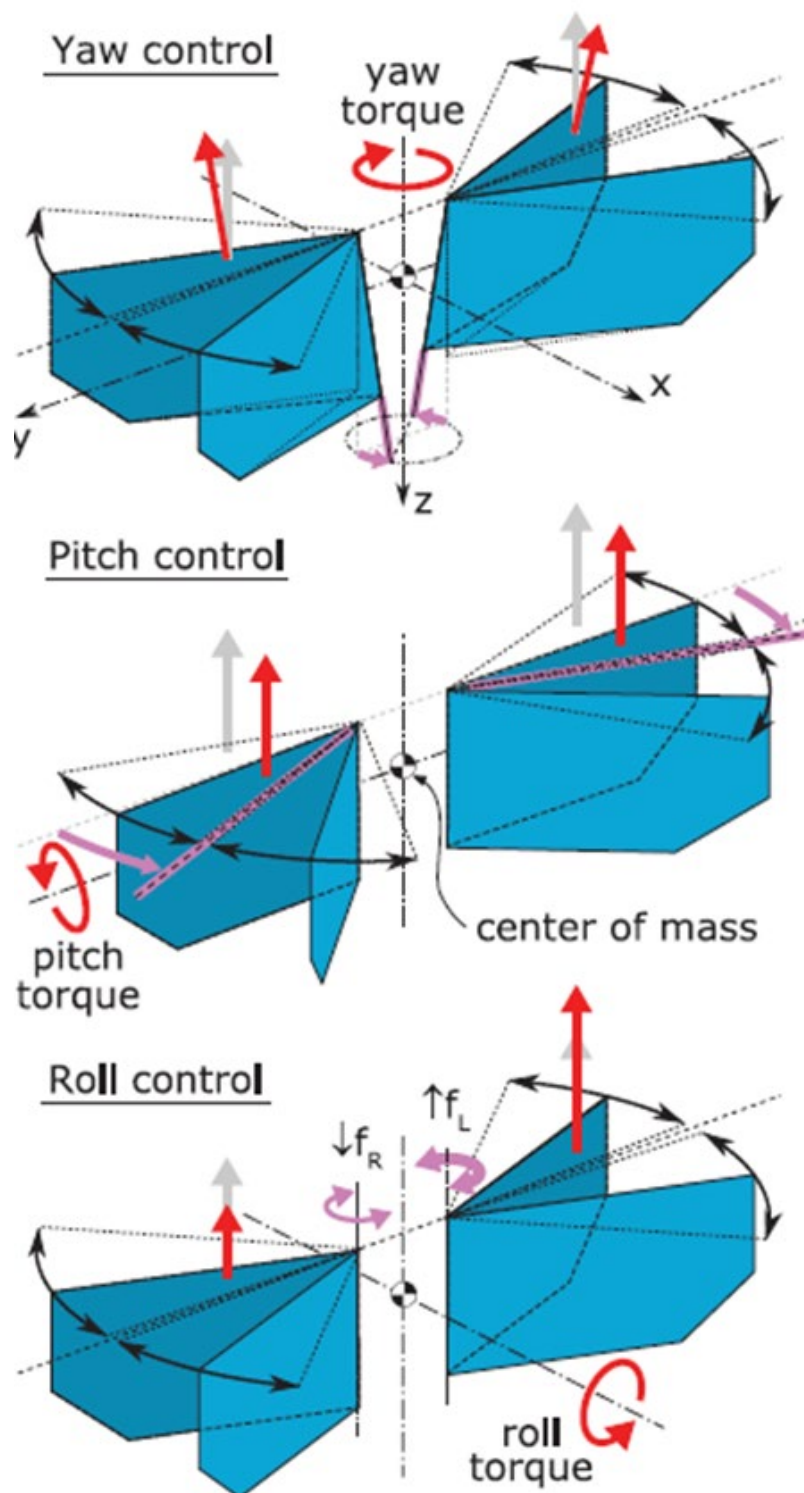


Abbildung 19 : Steuerung der Orientierung im Freiflug. Das Giermoment (Yaw Control) wird durch Ändern des Flügelwurzelwinkels gesteuert, sodass die Schubvektoren des linken und rechten Flügels in gegengesetzte Richtungen zeigen. Das Nickmoment (Pitch Control) wird durch Anpassung des Winkels um die Mittellinie der Flügel gelenkt. Das Rollmoment (Roll Control) wird durch Unterschiede zwischen dem linken und rechten Flügel hinsichtlich deren Einklappwinkel erzeugt. Die grauen Pfeile zeigen die Richtung der nominalen aerodynamischen Schubvektoren, in Rot sind die Pfeile der durch die jeweiligen Momente veränderten Schübe angezeigt [KAR18]

Den Forschern ging es hauptsächlich um die Agilität der Drohne während dem Flug. Mit ihrer Konstruktion konnten sie 360° Drehungen bezgl. dem Nick- und Rollwinkel und dabei eine Winkelbeschleunigung von $5000^{\circ}\text{s}^{-2}$ erreichen. Allerdings liegt das Schub-zu-Gewicht Verhältnis mit 1,3 hinter dem von fliegenden Insekten mit teilweisen Werten von ≥ 2 . Um weiter die Möglichkeiten von Ornithopterdrohen zu demonstrieren, wurde das Fluggerät so programmiert, dass es die Flugbewegungen einer Fruchtfliege bei der Flucht vor Räufern imitiert.

Die Forscher kamen zu dem Ergebnis, dass die Drohne der Fliege hinsichtlich der Winkelbeschleunigung beim Nick- und Rollmoment ähnelt. Da der Flug der Fruchtfliege zum Manövrieren mehrere Freiheitsgrade gleichzeitig verändert, ist eine exakte Nachbildung nicht möglich gewesen. Das Problem beim Drohnenflug mit dieser Flugtechnik ist, dass nach der Beschleunigung im Giermoment, ein hoher Seitenschlupf am Ende der Kurve bleibt. Das Problem kann nur durch einen zusätzlichen Schub im Giermoment ausgeglichen werden, allerdings ist dafür ein genaues Timing mit komplizierter Steuerung notwendig. [KAR18]

Bezüglich der Flugart im Vergleich zu den vorherigen Modellen besteht der klare Vorteil dieser Mikrodrohne in der Rumpfstabilisierung. Das Fluggerät muss sich nicht im Takt des Flügel-schlages heben und senken, wie es bei einer einem Schmetterling nachempfundenen Drohne notwendig wäre. Die Rumpfneigungen sind vom Manöver abhängig, bei stabilem Flug in einer ausgewählten Richtung, bleibt auch die Rumpfneigung stabil. Erst bei Richtungswechseln verändern sich der entsprechenden Raumwinkel (**Abb. 20**).



Abbildung 20 Neigung der Mikrodrohne beim Schwebflug, Vorwärtsflug und Seitwärtsflug [KAR18]

Das macht die Drohne offensichtlich nicht zu einem Schmetterlingsnachbau, allerdings macht sie das auch besser geeignet für beispielsweise Kameraaufnahmen im Schwebflug. Die Schwingungen des Rumpfes müssen nicht ausgeglichen werden, was die Aufnahme von Bildern wesentlich erleichtert. Da allerdings in der Studie das primäre Ziel der Manövrieruntersuchungen galt, gibt es keine Hinweise auf die Tragfähigkeit der Drohne. Hinzu kommen die fehlenden Angaben zur Batteriekapazität. Zwar wird genannt, wie weit die Drohne mit einer Aufladung fliegen kann, aber nicht welche Batterie dafür verwendet wurde. [KAR18]

Es ist also noch weiter zu forschen, falls Drohnen mit Schmetterlingsflug gebaut werden, welche Energiebereitstellung notwendig ist, um ein solches Fluggerät in der Luft zu halten und welche Lasten bewegt werden können. Außerdem ist das Problem mit dem sich in der Flügelschlagfrequenz neigendem Rumpf zu lösen. Einem Schmetterling macht es nichts aus, seinen Körper, um mehrere Dutzend Grad zu neigen, Bildaufnahmen werden allerdings erschwert. Auch Videoaufnahmen würden ohne eine entkoppelte Halterung nur schwer erkennbare Objekte ablichten. Eine Entkopplung der Schwingbewegung bedarf allerdings konstruktiver Änderungen, die bisher nicht auf Machbarkeit untersucht wurden. Die Forschung ist noch nicht so weit fortgeschritten, der Fokus liegt noch immer auf der Grundlagenforschung und generelle Machbarkeitsstudien.

7 Flügelstruktur

Die Natur hatte Millionen an Jahren Zeit sich zu entwickeln. Das Grundprinzip der biologischen Bauweise geht den Weg der geringsten Energie mit der leichtesten und wenn möglich langlebigsten Konstruktion. So hat sich auch der Schmetterlingsflügel hinsichtlich dieser drei Kriterien über die Jahrtausende hin entwickelt.

Da das Wachsen von Körperteilen immer mit Energie verbunden ist, lässt die Natur nur solche Stellen verstärken, an denen die größte Belastung auftritt. Es gibt drei fundamentale Prinzipien beim Körperbau:

- Wenn möglich keine Zugbeanspruchung da sie keine Biegesteifigkeit benötigen
- Druckbeanspruchung wird durch Profilierung und stützende Elemente gestärkt
- Torsionsbeanspruchungen werden vorrangig in belastbaren Randschichten mit gelochtem Kern eingebracht [KLE11]

Des Weiteren sind die verwendeten Naturmaterialien mit einer geringen Dichte ausgezeichnet. Im Falle des Schmetterlings ist es Chitin mit einer Dichte von 140 gmm^{-3} (Chitin als Werkstoff wird im folgenden Kapitel behandelt). [KLE11]

Insektenflügel sind mit wenigen Ausnahmen immer nach dem gleichen Venenmuster aufgebaut. Es gibt eine Basis, an der der Flügel mit dem Insektenrumpf angewachsen ist, einen oberen Rippenbogen, einen hinteren Bogen und den Analrand der die äußeren Ränder des Flügels darstellt.

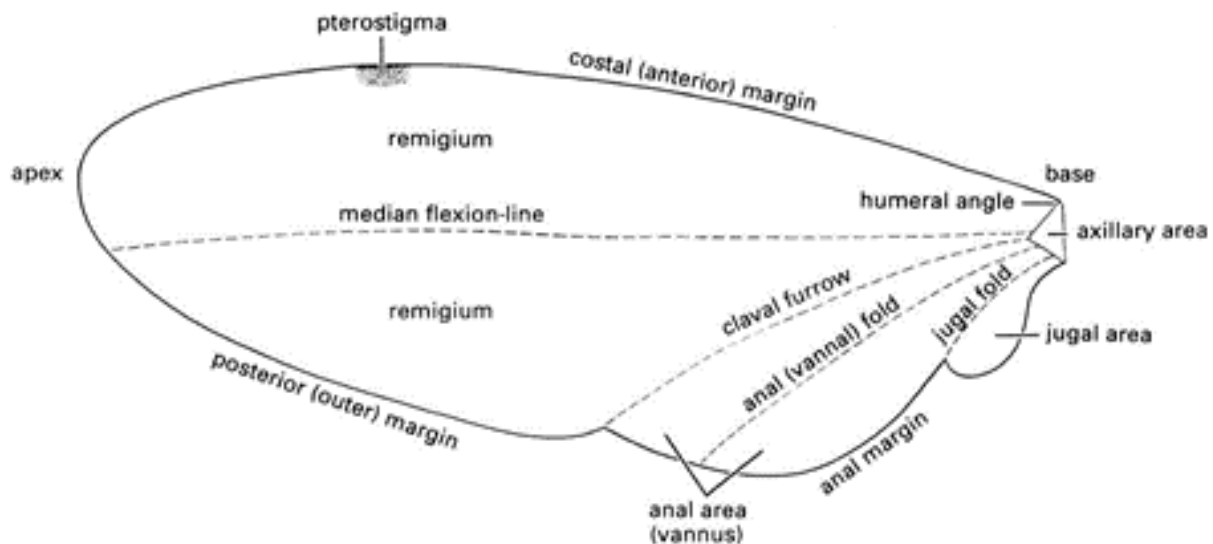


Abbildung 21 Nomenklatur für die Hauptbereiche, Falten und Ränder eines verallgemeinerten Insektenflügels [ENT21]

Schmetterlingsflügel sind überaus nicht glatt. Die Oberfläche ist mit Schuppen bedeckt (Abb. 22). Die Schuppen sorgen für die schillernde Farbe, erhöhen den Auftrieb und Steifigkeit beim Flug, sowie dienen durch die große Oberfläche dem Temperatenausgleich des Insekts. [NAC13]

Igor Kovalev aus Israel hat das Phänomen der Schmetterlingsschuppen in Bezug auf Luftwiderstand als Vorbild für eine Beschichtung für oszillierende Schwinger untersucht. Im Versuch wurde eine Windturbine mit nachgebauter Schmetterlingshaut überzogen. Die Messwerte ergaben einen erhöhten Auftriebsfaktor von 1,15 mit einer einhergehenden aerodynamischer Reibungsreduzierung im Vergleich zur traditionellen Windturbine. [KOV10]

Als Basis für ihr Experiment untersuchten sie Schmetterlingsflügel unter dem Mikroskop. Es ist bekannt, dass der Schmetterlingsstaub, der an den Finger haften bleibt, wenn man einen Schmetterling am Flügel berührt, diese Schuppen sind. Das Insekt besitzt mehrere Millionen der beweglichen Schuppen auf der Ober- und Unterseite der Flügel. In Abbildung 22 sind die Flügel unter einem Rasterelektronenmikroskop zu sehen. Es wird ab 10 µm deutlich, dass die Schuppen in ihrer Struktur unterbrochen sind. Es ist davon auszugehen, dass sich diese ca. 1 µm große Durchbrüche positiv auf die Manövrierfähigkeit auswirken. [KOV10]

Abbildung 23 zeigt die Durchbrüche im Modell. Es wird deutlich, dass die Schuppen aus zwei Schichten bestehen, die in zwei Ebenen angeordnet sind. Aus der unteren Schicht (untere

Lamina LL) bilden sich Trabekel T, die zur oberen Schicht (obere Lamina UL) wachsen. Die obere Schicht ist das, was in Abbildung 22 in den unteren beiden Bildern zu sehen ist, eine Struktur, die mit Längs- und Querrippen versehen ist.

Die obere Schicht, mit seiner V-förmigen Gestalt bildet mit den längs gerichteten Kanälen Luftdurchgänge, bis zur luftundurchlässigen unteren Schicht. [KOV10]

Das Modell ist im Leichtbau unter der Sandwichstruktur bekannt. Zwei Schichten, die durch eine Stützschrift in der Mitte verbunden sind. Die Trabekel übertragen die mechanischen Kräfte auf die großen Oberflächen der oberen und unteren Lamina. Bauteile nach dem Sandwichprinzip werden in der Luftfahrt, im Rennsport oder Maschinenbau eingesetzt. Der Vorteil der Bauart ist, dass die Deckschichten Zug- und Druckbeanspruchung aufnehmen, wohingegen die innere Schicht Querkräfte als Scherbeanspruchung einfängt. [ROS20]

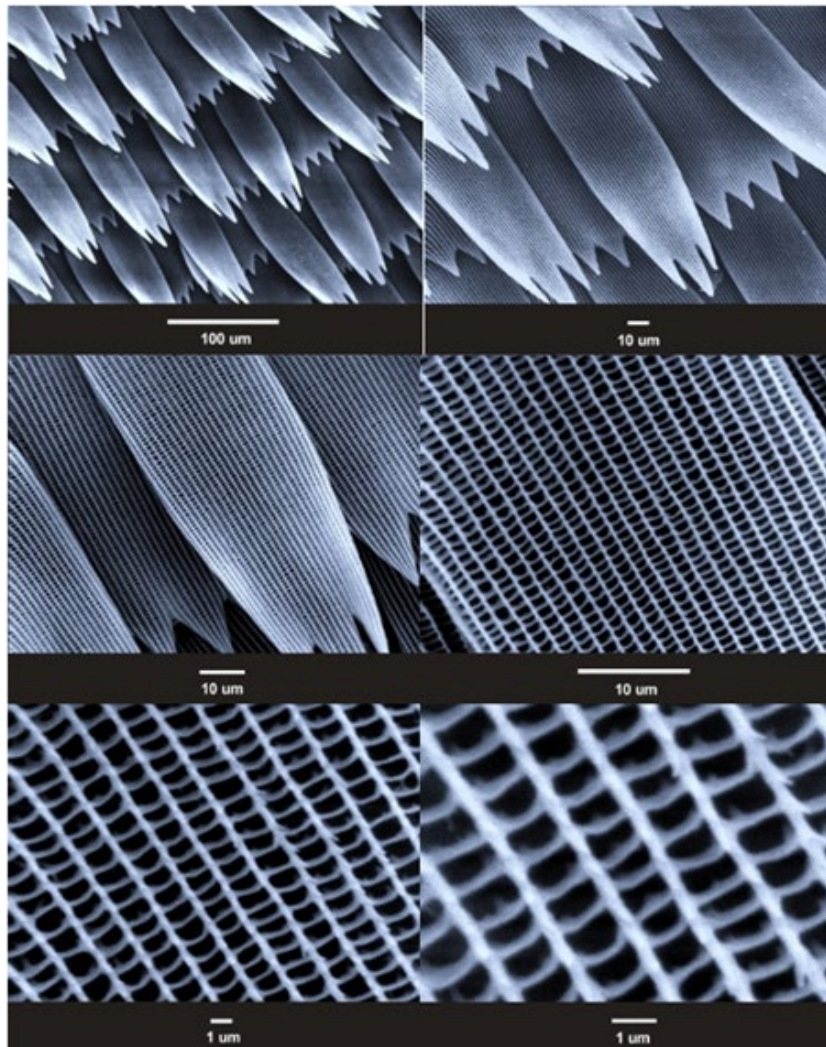


Abbildung 22 Schmetterlingsflügel unter dem Rasterelektronenmikroskop [VER21]. Zu sehen sind die Schuppen bei den ersten drei Vergrößerungen. Im unteren Teil ist die obere Lamina abgebildet (vgl. Modellansicht Abb. 23)

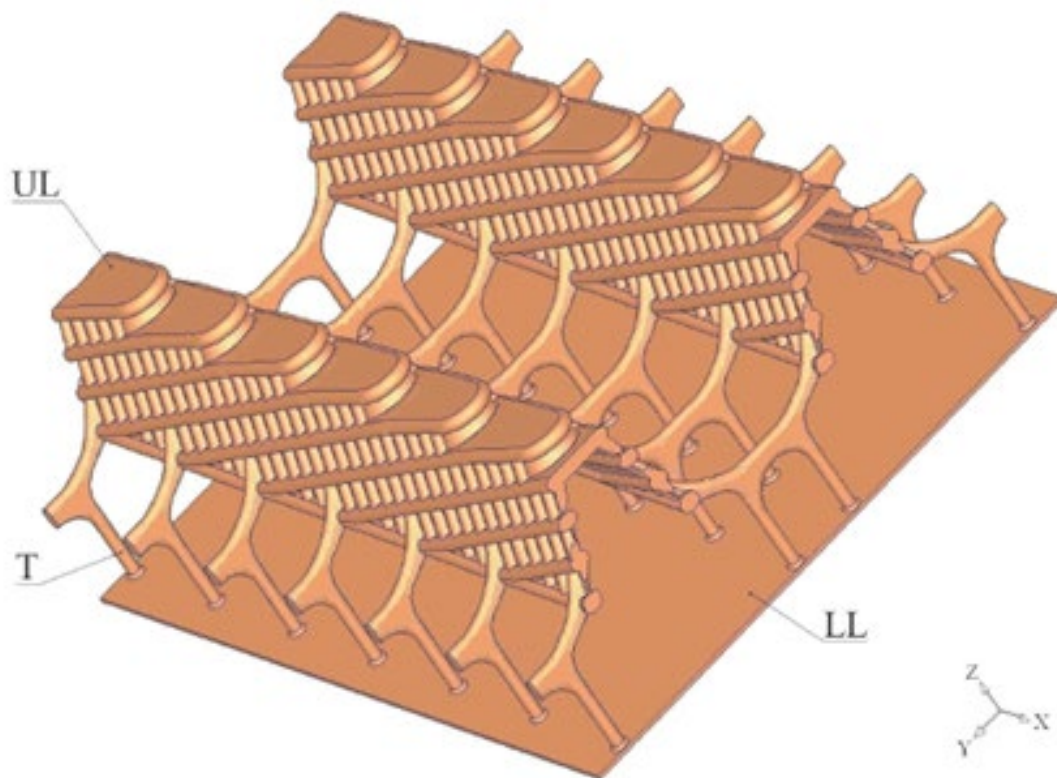


Abbildung 23 Modell einer Schmetterlingschuppe [KOV10]. Die obere Lamina UL wird über die Trabekel T mit der unteren Lamina LL verbunden

Bei einer Verdopplung der gesamten Bauteildicke vergrößert sich das Gewicht nur um etwa 3%, allerdings steigt die Steifigkeit um ein siebenfaches an. Damit sind die Schmetterlingsflügel Vorbild für eine materialminimierte Struktur bei optimierten Kraftfluss. [TEC21]

Der Schmetterling bildet seine Flügel noch im Kokon aus. Kurz nachdem er geschlüpft ist, sind die Flügel noch sehr empfindlich, nass und zerknittert. Erst wenn sich der Schmetterling kopfüber an einen Ast hängt und Blut in die Venen fließt entfalten sich die Flügel. [ENC00]

Die allgemeine Struktur der Flügel besteht aus einem Verbund aus Venen und dünner, mit Schuppen überzogener Haut. Damit sorgen sie für Elastizität und für die nötige Stabilität mit dem richtigen Grad an Deformierung während dem Flügelschlag. Die Deformierung ist hauptsächlich von der Anordnung der Venen abhängig.

Ein Forscherteam aus Japan hat Untersuchungen angestellt, um den Zusammenhang zwischen der Venenanordnung im Flügel und der Manövrierfähigkeit des Schmetterlings zu verstehen.

Das Team arbeitete 2008 an einer Nachbildung eines Schmetterlings hinsichtlich der Venenstruktur und deren Einflüsse auf die Steifigkeit. Für ihre Experimente entwickelten sie drei Modelle mit unterschiedlicher Anordnung und Dicke der Polyurethanvenen. [TAN08]

Die Membran wurde aus Parylen gefertigt. Parylen wird als Schutzbeschichtung für Leiterplatten und durch Aufdampfen aufgebracht. Das Material wird von Lösungsmittel nicht beeinflusst, hat hydrophobe Eigenschaften, ist biokompatibel und weist einen niedrigen Reibungskoeffizienten auf. [PAR19]

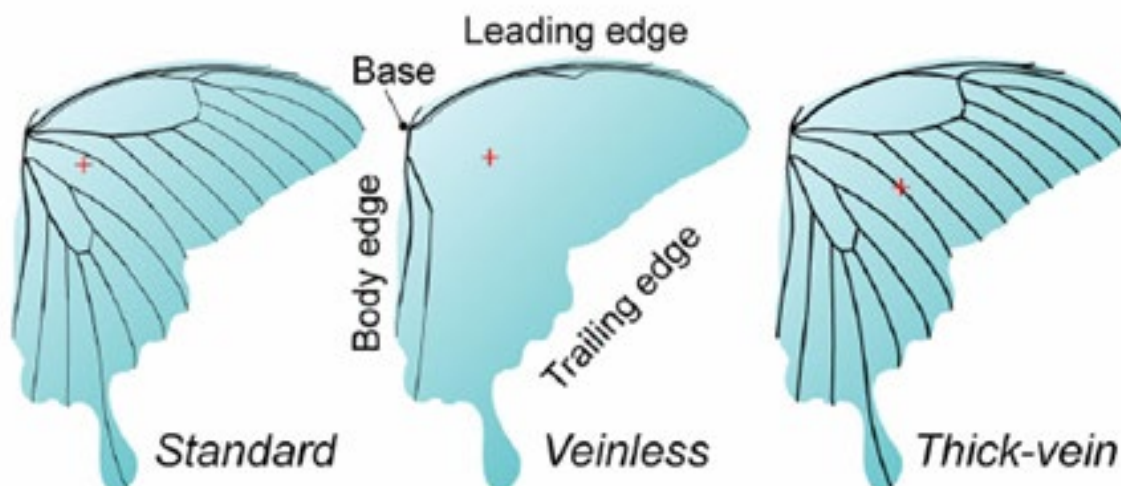


Abbildung 24 Drei Typen von Versuchsflügeln, das rote Kreuz markiert den Massenschwerpunkt. Der Massenschwerpunkt des Flügels mit durchgängig dicken Venen ist im Vergleich zu den anderen beiden weiter von der Flügelbasis entfernt. [TAN08]

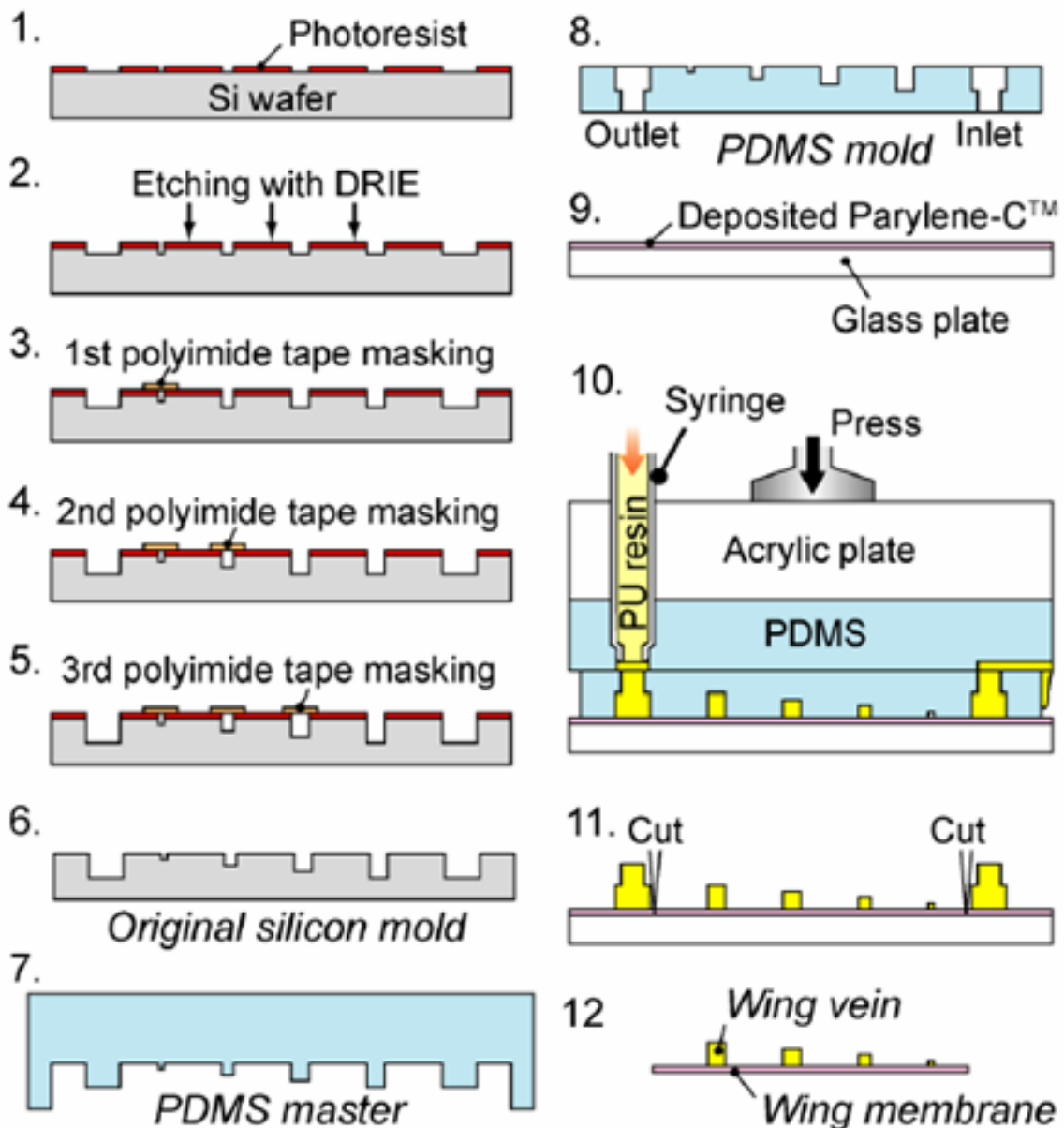


Abbildung 25 1.6. Herstellung der Form; 7.-8. Herstellung der Silikonnegativform mittels Polydimethylsiloxane (PDMS); 9. Aufbringen des Parylenfilms auf Glasplatte als Flügelmembran; 10. Polyurethanresin wird auf den Parylenfilm in die Form gefüllt; 11.-12. der fertige Flügel wird von der Glasplatte entnommen und aus der Form entfernt [TAN08]

Das Forscherteam hat die Venen in vier Gruppen sortiert, geordnet nach Länge und Dicke. Die Venen werden beim Schmetterling kleiner und dünner, je weiter sie sich von der Flügelbasis entfernen.

Für die Herstellung einer ursprünglichen Form wurde unter Verwendung von MEMS-Fotolithografie Flügel mit einem Venendurchmesser von einem Mikrometer hergestellt. Auf einen Siliziumwafer wurde Fotolack in Form des späteren Flügels aufgebracht (Abb.24 1.). Durch Ionenätzen entstehen die Kuhlen (2.), in denen später die künstlichen Venen liegen. Um vier verschieden dicke Venen herzustellen, wurde Polyamidtape in mehreren Lagen aufgebracht

(3.-5.). Flüssiges Silikonresin (Polydimethylsiloxane PDMS) füllt die Silikonform (6.) und nach dem vollständigen Aushärten entsteht die Negativform des Schmetterlingflügels (7.). Im Anschluss wird durch erneutes Gießen die Originalform aus PDMS (8.) hergestellt. Für das Ein- und Auslassen des Parylens wurde manuell mit einem Skalpell Löcher in die Seiten der Form geschnitten.

Nachdem die Form hergestellt ist, kann auf eine Glasplatte das Parylen in einer 3 µm dicken Schicht aufgetragen werden (9.). Das Polyurethan als künstlicher Venenersatz wird durch den Einfluss der PDMS Form auf die Parylenschicht aufgetragen (10.). Der fertige Flügel muss nach dem vollständigen Aushärten des Polyurethans noch mittels Skalpell in seine endgültige Form geschnitten werden. [TAN08]

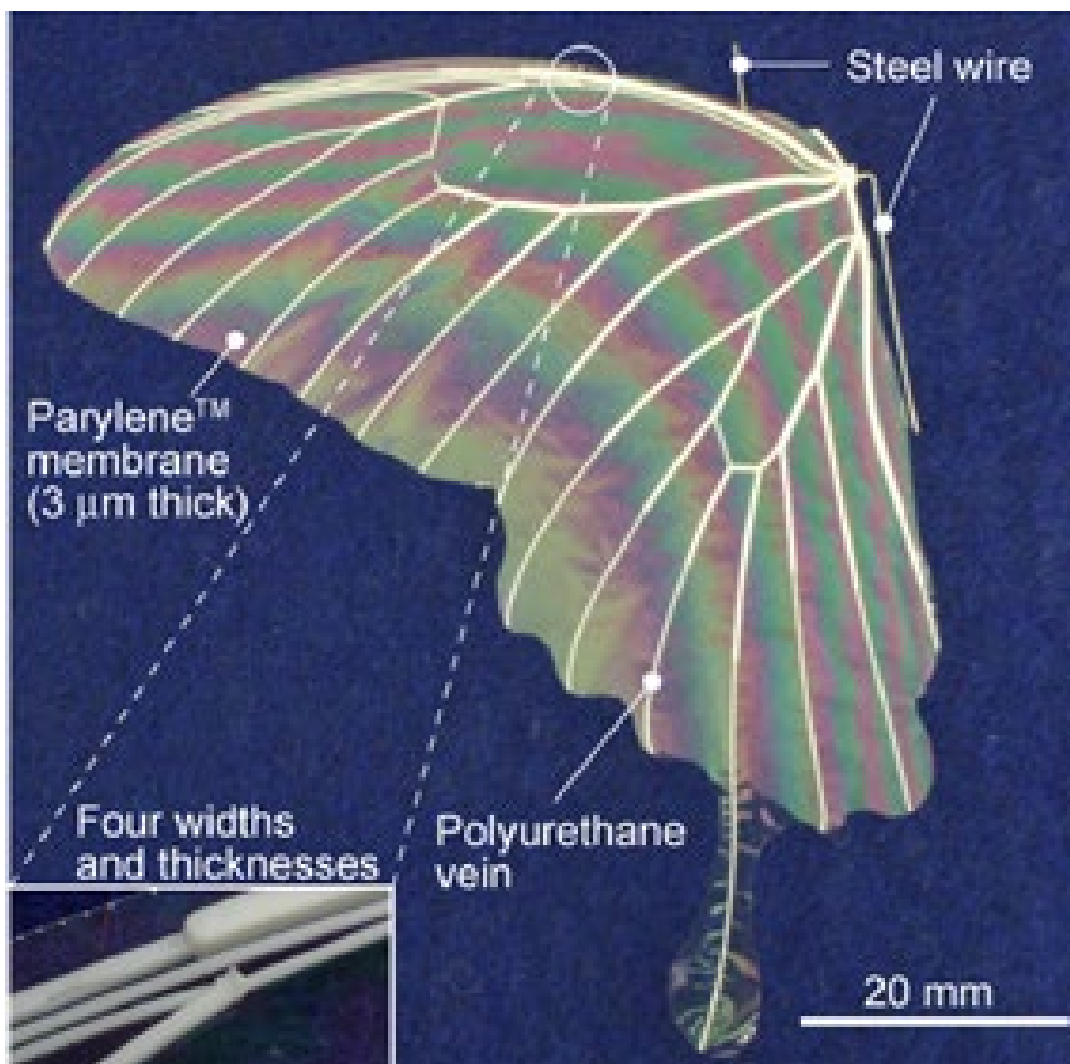


Abbildung 26 Künstlich hergestellter Schmetterlingsflügel mit vier verschiedenen Größen an Venen [TAN08] Die dicksten Venen befinden sich an der Flügelwurzel und verjüngen sich in Richtung Flügelrand

Die fertige Schmetterlingsnachbildung kommt seinem biologischen Vorbild mit einer Schlagfrequenz von ungefähr 10 Hz sehr nah. Mit diesem Fluggerät war eine Flugdauer von gerade mal zwei bis drei Sekunden erreichbar.

Der Vergleich der drei Flügelarten ist in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 3 Übersicht der drei Flügelkonstruktionen Standard, Venenlos und Dickvenen [TAN08]

	Standard	Venenlos	Dickvenen
Flügelpaarmasse [mg]	135	107	374
Masse der übrigen Körperteile [mg]	248	235	312
Gesamtgewicht [mg]	385	342	686
Flügelast [Nm ⁻²]	0,81	0,72	1,44

Der Ornithopter mit den Standardflügel flog mit 1 ms⁻¹ und mit einem mittleren Anstellwinkel des Rumpfes von -0,5° am langsamsten. Der Schmetterlingsnachbau mit dicken Venen flog mit einem Anstellwinkel von -0,4° des Rumpfes und mit fast 1,5 ms⁻¹ schneller. Der Ornithopter ohne Venen flog am schnellsten. Er erreichte eine Geschwindigkeit um die 1,6 ms⁻¹ mit dem kleinsten Anstellwinkel von -0,6°.

In Bezug auf die aerodynamischen Kräfte war der Nachbau mit durchgängig dicken Arterien überdimensioniert. Der Standardflügel, als Nachbildung der Realität, hatte eine ausgewogene Steifigkeit und war auf die tatsächlich wirkenden Kräfte optimiert. Der venenlose Flügel verzeichnete die geringsten aerodynamischen Kräfte, was auf die Verformung des Flügels, während dem freien Flug zurückzuführen ist. [TAN08]

Die Forscher kamen zu dem Schluss, dass die Venenverteilung des Schmetterlings für den Flug mit geringer Geschwindigkeit optimiert ist, da sowohl das Verhältnis von Flügelgewicht und Auftriebskoeffizient und Luftwiderstandsbeiwert im guten Bereich liegen. Der Auftriebskoeffizient sowie der Luftwiderstandsbeiwert sind Zahlen, die die Abhängigkeiten von Form, Neigung und Strömungsbedingungen beim Auftrieb modellieren. [HAL21]

Die nächste Frage lautet, was die Ergebnisse mit einer Mikrodrohne zu tun haben. Erstmal zeigen sie, dass die Flügelstruktur mit den entstehenden aerodynamischen Kräften nicht für weite Strecken geeignet ist. Im Versuch wurden Flugzeiten von wenigen Sekunden erreicht, was klarstellt, dass diese Flugtechnik aktuell nicht für Drohnenflug geeignet ist. Es stellt sich

also die Frage, ob ein flatterndes Fluggerät in nächster Zeit serienmäßig verkaufbar wird und kommerziell lohnenswert ist.

Weiterhin lässt sich aus der letzten genannten Studie mehr als nur die Auftriebskoeffizienten und die Luftwiderstandsbeiwerte weiterverwenden. Der Schmetterlingsflügel mag zwar als schwingendes Fluggerät aktuell nicht nutzbar sein, allerdings ist die Flügelstruktur dennoch auf andere Anwendungsbeispiele übertragbar.

Der Flügel besitzt an seinen äußeren Rändern Verstärkungsvenen, die für die Stabilität während des Flugs sorgen. Auch die Quervenen tragen minimalistisch zur Beständigkeit der Flügel bei. [DIR12] Damit werden die Bereiche unterstützt, die besonders beansprucht werden. Dieses Prinzip findet sich bei vielen unterschiedlichen Tieren (vgl. Eingangsbeispiele der Bionik in Kapitel Technische Biologie im Leichtbau).

Ein Forscherteam vom Trinity Centre for Bioengineering aus Dublin untersuchte das Venenmuster von Insektenflügel hinsichtlich der Bruchzähigkeit und Rissausbreitung. Aufgrund der Struktur und Morphogenetik können Risse im Flügel als Teil des Exoskeletts nicht repariert werden. Deswegen bleibt den Schmetterlingen nichts anderes übrig, als die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung zu minimieren. [DIR12]

Ein Netzwerk aus Längs- und Querschnittsvenen teilt die Flügeloberfläche in kleinere Zellen auf. Deren strahlenartige Struktur sorgen hauptsächlich für die Steifigkeit über die Spannweite und erhöht die Torsionsfestigkeit.

Bei Untersuchungen von Wüstenheuschrecken wurde festgestellt, dass beim Herunterschlagen der Flügel es zu Zugkräften senkrecht zu den Längsvenen kommt.

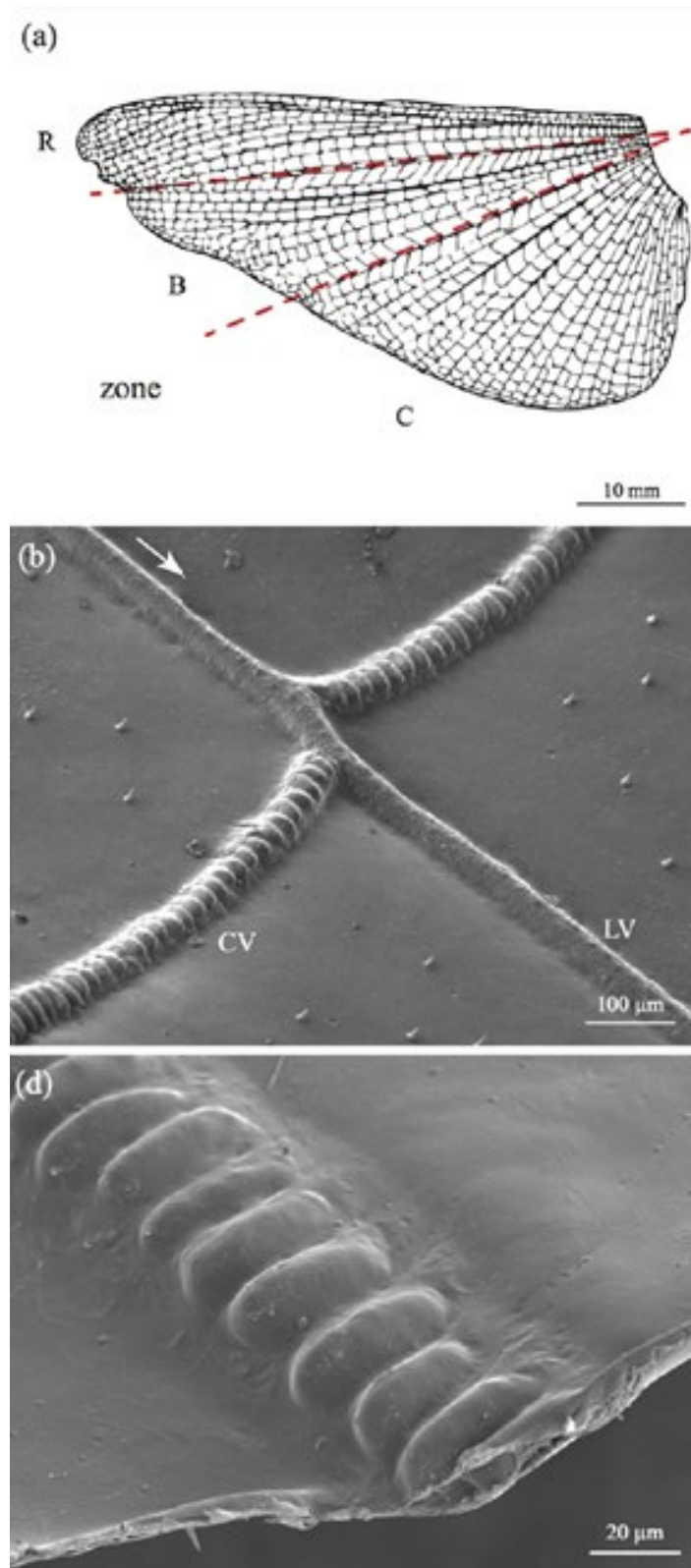


Abbildung 27 (a) Schematische Aufzeichnung der Heuschreckenflügel mit den Flügelzonen R, B und C, (b) Longitudinale Venen (LV) mit Kreuzvenen (CV). Im hinteren Teil des zweiten Flügelpaares zeigen die longitudinalen Venen eine andere Morphologie als die Kreuzvenen. Während die longitudinalen Venen ein rundes bis epileptisches Muster zeigen, besitzen die Kreuzvenen ein geringeltes Bild, (d) vergrößerte Ansicht der Kreuzvene mit geringeltem Muster [DIR12]

Die Ergebnisse zeigen, dass ein durch einen Längsschnitt induzierter Riss Zugkräfte bis zu einer gewissen Grenze aushalten, bevor sich der Riss durch den Flügel ausbreitet. Risse, die sich in Richtung einer Längsvene ausbreiten, werden bei Erreichen der Vene abgelenkt und verlaufen weiter parallel dazu. Die Forscher konnten keinen einzigen Riss beobachten, der sich durch eine Längsvene fortgesetzt hat. Erreicht ein Riss eine Kreuzvene gibt es zwei Ausbreitungsmöglichkeiten. Entweder es bildet sich ein Sekundärriss, bedeutet der Riss setzt sich ohne die Vene zu verletzen auf der anderen Seite weiter aus, oder die Spannungen sind zu groß und es kommt zum Riss der Kreuzvene.

Bei der Rissentwicklung kommt es entscheidend darauf an, in welcher Flügelregion er entsteht (vgl. Abb. 27 (a) mit Regionen R, B und C). Die Forscher konnten die in Tabelle 4 aufgelisteten Steifigkeits- und Festigkeitswerte ermitteln. [DIR12]

Tabelle 4 Zusammenfassung der Steifigkeit und Festigkeit gemessen bei Wüstenheuschrecken in den drei Flügelbereichen [DIR12]

Zone	Biegesteifigkeit [Nmm ⁻²]	Druckspannung [Nmm ⁻²]
R	255,2	25,52
B	233,93	26,24
C	323,79	32,37

Es fällt auf, dass die untere Zone C die höchsten Biegesteifigkeitswerte aufweist. Das ist allerdings auf die Flügelbewegung beim Flug zurückzuführen. Während der obere Teil der Flügel sich bei der Hälfte des Abschlages wieder nach oben dreht, bleibt der untere Teil gerade (vgl. Kapitel Schmetterlingsflug). Deswegen wäre es hinderlich, wenn sich der hintere Teil des Flügels bei Belastung verbiegt, wenn doch hier Teilkräfte für den Auftrieb erzeugt werden.

Um die maximal mögliche Risslänge beim Flügel zu untersuchen, haben die Forscher die mittlere Länge einer einzelnen Flügelzelle untersucht. Mehr als 99% aller Zellen liegt zwischen 1 mm und 1,2 mm. Die Zelllänge wird größer, je mehr man sich von den Flügelkanten in Richtung Flügelbasis bewegt. Die größten Zellen sind im Flügelzentrum zu finden (Abb. 28). Eine Theorie für die kleineren Zellgrößen zum Flügelrand hin sind die steigenden Belastungen in der Randzone der Flügel aufgrund der aerodynamischen Kräfte beim Flug. Außerdem ist es weit aus vertretbarer, bei einem potenziellen Riss nur eine kleine Zelle zu verlieren, anstatt eine mit großer Länge. [DIR12]

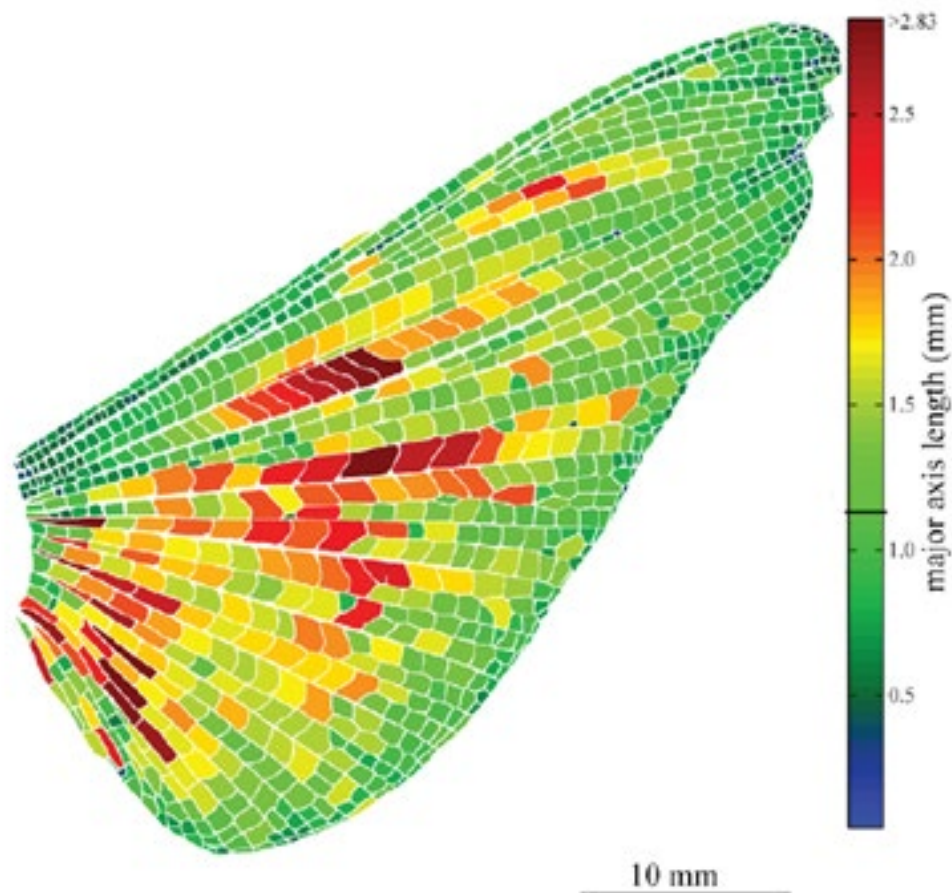


Abbildung 28 Struktur der durch Venen eingegrenzte Zellen eines hinteren Flügels mit farblicher Einteilung der Zelllängen. Die mittlere Zelllänge wird zu den äußeren Flügelrändern hin kleiner [DIR12]

Der Artikel der irischen Forscher schließt mit dem Fazit, dass aktuell entwickelte Drohnen mit einem Flügelschlagprinzip noch stark durch die mechanische Belastung beim Auf- und Abhub limitiert sind. Jedoch können durch verbesserte Batterien und effizientere Antriebe die Ermüdungserscheinungen der Drohnen reduziert werden. Entwickelt man nun diese Drohnen entlang des natürlichen Vorbildes des Insektenflügels, kann die Haltbarkeit maßgeblich verbessert werden. Gleichzeitig wird im Sinne des Leichtbaus das Gewicht bei einem Minimum gehalten. [DIR12]

8 Fazit

Die ersten Mikrodrohnen waren einfache verkleinerte Versionen von funktionierenden Flugmaschinen. Hubschrauber konnten allerdings nur mit wenig Erfolg verkleinert werden. Bei der Verkleinerung treten andere Flugkräfte auf, die bei der Originalgröße nur wenig Relevanz besitzen (beachte auch den Vergleich der Reynoldszahl Abb. 2). Es ist deshalb nur logisch, sich an natürlichen Beispielen wie Insekten für die Konstruktion zu orientieren. Allerdings hat sich gezeigt, dass exakte Nachbildungen nur schwer möglich sind, da viele Aspekte wie Steuerung, Gewicht und Energieversorgung sehr komplexe Vorgänge beim Insektenflug sind. Es stellt sich heraus, dass der Versuch einer exakten Nachbildung oft nicht zu einer flugfähigen Drohne führt. [MIC10]

Flügelschlagende Drohnen werden in Anwendungsbeispielen vorrangig in innenliegenden Gebäuden genannt. Die Möglichkeit auf engstem Raum zu manövrieren machen Ornithopter fähiger als Starrflügler in Räumen zu operieren. Zudem hat mit den eMotionButterflies die Firma Festo bereits bewiesen, dass die Drohnen im Schwarm einsetzbar sind. [FRO15]

Die Energieversorgung bei schlagenden Mikrodrohnen stellt sich als eine der größten Herausforderungen dar. Flügelschlagende Insekten verbringen den Großteil ihres Tages mit der Nahrungssuche, um ihren hohen Energiebedarf zu decken. In einem Artikel aus der Encyclopedia of Aerospace Engineering aus 2010 wird erläutert, dass bei einer durchschnittlichen Mikrodrohne 50 % des Gesamtgewichtes für die Energiespeicherung reserviert ist. Eine naheliegende Gewichtsreduktion der Rumpfkonstruktion kann durch mehr Energiespeicherkapazität und damit einer Erhöhung der Flugdauer erreicht werden. [MIC10]

Die Gewichtsreduktion kann durch die Verwendung von künstlich hergestellter Seide umgesetzt werden, wie sie als Biosteel der Firma AMSilk vermarktet wird. Auch die Version der Firma Festo kann zur Konstruktion der Drohne verwendet werden. Der klare Vorteil gegenüber herkömmlichen 3D gedruckten Werkstücken ist die Möglichkeit, frei in die Luft zu drucken, anstatt das Bauteil in Schichten aufbauen zu müssen. [FRO16] Allerdings ist noch zu verifizieren, ob und wie eine Nachbearbeitung im Sinne von Bohren, Nieten oder Kleben möglich ist.

Neben dem Material kann die Drohne zusätzlich gewichtssparend und gleichzeitig belastbar konstruiert werden. Der Aufbau des Schmetterlingflügels hat bewiesen, unter den wirkenden Kräften optimal gegen Rissbildung und äußere Beschädigung gebaut zu sein. [DIR12] Allerdings ist die Konstruktion der Flügel als Vorbild nicht nur für Mikrodrohnen anwendbar. Theoretisch kann jedes Bauteil, mit hoher Biegebeanspruchung einem Schmetterlingsflügel nachempfunden werden. Das Prinzip ist dahingehend sehr simpel, es werden die Bereiche des Materials verstärkt, auf denen die meiste Belastung liegt, Bereiche an denen kleinere Kräfte angreifen, werden kleiner dimensioniert. Teile mit hoher Risswahrscheinlichkeit werden in

kleineren Zellen aufgebaut, um eine Rissverbreitung zu minimieren. [DIR12] Nicht nur der Schmetterlingsflügel funktioniert nach diesem Prinzip. Vergleicht man die Rückseite einer See-rose mit der Venenstruktur eines Schmetterlingsflügels, fallen gewisse Parallelen auf (vgl. Abb. 1 und Abb. 27(a)).

An Turbinen, an denen möglichst viel Windenergie eingefangen und umgewandelt werden soll, hat sich bereits eine Verbesserung des Wirkungsgrades durch eine Nachbildung der Flügeloberfläche ergeben. [KOV10] An Flugzeugen gibt es aktuell keine Versuche, die Oberfläche in Schmetterlingsflügelstruktur nachzuempfinden. Lufthansa arbeitet zurzeit an einer Außenbeschichtung nach dem Vorbild der Haifischhaut. Das Ziel ist die Verminderung von störenden Luftverwirbelungen und damit eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs. [KAI19] Somit gilt es, die Möglichkeiten der Flügelstruktur weiter auf praktisch orientierte Beispiele zu übertragen und den Benefit zu ermitteln.

Nicht alle in dieser Arbeit diskutierten Schmetterlingsnachbildung gelten nach der Definition des Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) als Mikrodrohne. Die Agentur legte 1997 fest, dass ein MAV eine ungefähre Spannweite von 150 mm besitzt und nicht schwerer als 100 g sein darf. Zusätzlich muss eine Flugdauer zwischen 20 bis 60 Minuten möglich sein. Neben den Mikrodrohnen setzte die Agentur zusätzlich die Ansprüche für Nano-drohnen. Eine Drohne gilt hier als Nano, wenn ihr Gewicht nicht schwerer als 20 g und kleiner als 150 mm ist. [PET11]

Die bisher fliegenden Schmetterlingsdrohnen besitzen allerdings Spannweiten größer 200 mm. Die Nachbauten der Firma Festo sogar 500 mm. Daher können diese nicht als Mikrodrohne bezeichnet werden. Hinsichtlich des Gewichtes erreichen manche Nachbildungen allerdings schon Nano Air Vehicle (NAV) Dimensionen.

Zusammenfassend ist es mit den aktuellen Konstruktionen nicht möglich, die Bedingungen für Mikrodrohnen zu erfüllen. Allen voran die Flugdauer von mindestens 20 Minuten liegt noch in weiter Ferne. Dafür sind die aerodynamischen Kräfte noch zu unerforscht und zu komplex, um sie mit einer einheitlichen Steuerung auszugleichen. Es muss weiter Grundlagenforschung hinsichtlich der wirkenden Kräfte am Fluggerät betrieben werden, ähnlich dem Computermode-ll im Kapitel des Schmetterlingsflugs, bevor längere Flugdauern als einige Sekunden realisierbar werden.

9 Ausblick

Nicht nur als Vorbild für den Leichtbau können Schmetterlingseigenschaften verwendet werden. Es gibt mindestens drei weitere Aspekte des Insekts, welche auf technische Anwendungen übertragen wurden und jetzt neue Funktionen ausfüllen. Im Folgenden werden Chitin als Baustoff, die mikroskopische Flügelstruktur als Vorbild für Solarzellen sowie die Facettenaugen des Insekts dargestellt.

Chitin ist der Hauptbestandteil der Insektenpanzerung. Es ist ein stickstoffhaltiges Polysaccharid. Durch zusätzliche Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den benachbarten Polymeren ist Chitin stabiler als Zellulose. [HEP21] Chitin wurde 1822 vom französischen Botaniker und Pharmazeut Henry Braconnot erstmals charakterisiert.

Technisch nachgebildet kann Chitin für Spezialanwendungen verwendet werden. Eine Gruppe von Wissenschaftlern an der Universität in Stuttgart forscht an additiven Fertigungsverfahren, in denen Chitin als Baustoff Anwendung findet. Es kann den Energieverbrauch von Gebäuden senken, ist resistent gegen Schimmel und dabei umweltfreundlich. Vorrangig wird Chitin bei Medizinprodukten verwendet, da es ungiftig, antibakteriell und antiallergene Wirkungen besitzt. Die Eigenschaften können zusätzlich durch einen angepassten Herstellungsprozess beeinflusst werden. [STE20]

Chitin bietet sich als Baustoff an, da es das zweithäufigste Biopolymere nach Cellulose auf dem Planeten ist. [FER20] Aktuell wird Chitin von Krabben, Krebsen und Garnelen



Abbildung 29 Die neuen Photovoltaikmodule lassen sich in einer gewünschten Farbe herstellen, rund 93% des Sonnenlichtes können die neu entwickelte Oberfläche durchdringen.

[EIT21]

abgeworfene Schalen gewonnen. [BIO21] Die geschätzte Biomasse allein von Meerestieren liegt bei 10^6 bis 10^7 Tonnen. [HEP21]

Energiegewinnung durch Solarzellen ist durch die deutsche Energiewende seit 2011 stark angestiegen. Solarzellen werden mittlerweile auf Privathäusern zur Stromgewinnung eingesetzt. Allerdings fallen die Photovoltaikanlagen meist störend ins Auge. Die schwarz-glänzenden Platten in Größe einer Badezimmerkachel sind keine beliebten Elemente bei Architekten. Das könnte sich nun durch angepasst Photovoltaikanlagen nach dem Vorbild des blauen Morphofalter ändern. Die Flügel des Schmetterlings besitzen eine mikrometerfeine Oberflächenstruktur, die nur gezielt einen engen Wellenlängenbereich, also eine bestimmte Farbe reflektieren. Mittels Vakuumverfahren werden die Deckgläser bedampft und können dann zu Photovoltaikanlagen oder Kollektoren zur solaren Wärmeerzeugung weiterverarbeitet werden. [EIT21]

Schmetterlinge besitzen wie viele andere Insekten Facettenaugen. Damit besitzen sie eine unendliche Tiefenschärfe, sind also in der Lage sehr schnell kleinste Bewegungen gegenüber einem weiten Halbraum zu registrieren. Diese Eigenschaft auf Digitalkameras zu übertragen stellte sich in der Vergangenheit schwer dar, da die bisherige planare Sensortechnik bzw. die konventionelle Optik den Anforderungen nicht entsprechen. 2013 stellte ein Team an internationalen Forschern ein Kamerasystem mit Halbkugelform vor, welches mit ca. 180 bildgebenden Elementen (künstliche Ommatidien) funktioniert. Damit können Bildaufnahmen in räumlichen Layouts mit einer entscheidenden Auflösungssteigerung zu herkömmlichen Kamerasystemen erreicht werden. [SON13]

Literaturverzeichnis

- [AMS21]** AmSilk GmbH (Hg.) (2019): Biosteel Fibers. Online verfügbar unter <https://www.am-silk.com/industries/biosteel-fibers/>, zuletzt geprüft am 03.03.2021.
- [ARM16]** Armanini, S. F.; Caetano, J. V.; Croon, G. C. H. E. de; Visser, C. C. de; Mulder, M. (2016): Quasi-steady aerodynamic model of clap-and-fling flapping MAV and validation using free-flight data. In: *Bioinspiration & biomimetics* 11 (4), S. 46002. DOI: 10.1088/1748-3190/11/4/046002.8bb
- [BEH21]** Behrens, Bernd-Arno; Bouguecha, Anas (2021): Prozessoptimierte neue Fertigungstechniken – Umformgen. In: MFP12
- [BAS21]** BASF SE (Hg.): Styropor. Online verfügbar unter <https://www.styropor.com/portal/basf/de/dt.jsp?seite=styropor-der-klassiker>, zuletzt geprüft am 17.03.2021.
- [BIO21]** BioLog Heppe GmbH (Hg.): Chitosan als Rohstoff. Online verfügbar unter <https://www.biolog-heppe.de/chitosan-als-rohstoff/>, zuletzt geprüft am 26.03.2021.
- [BLO10]** Blockley, Richard; Shyy, Wei (Hg.) (2010): Encyclopedia of Aerospace Engineering. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- [BLO07]** Blond, David; McCarthy, Denis N.; Blau, Werner J.; Coleman, Jonathan N. (2007): Toughening of artificial silk by incorporation of carbon nanotubes. In: *Biomacromolecules* (12), S. 3973–3976. DOI: 10.1021/bm700971g.
- [BOG15]** Boghun, Oliver; Kovar, Anke (2015): Luftfahrt-Schülerbooklet. Der große Traum vom Fliegen. Schülerinformationsheft (3).
- [BUN19]** Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2019): Empfehlungen für Gemeinsame Regelungen zum Einsatz von Drohnen im Bevölkerungsschutz.
- [BUR21]** Burkhardt, Jochen (2021): Topologieoptimierung. Online verfügbar unter <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/leichtbautechnologien/konstruktiver-leichtbau/topologieoptimierung.html>, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- [CHE21]** Chemie Schule (2021) : Polyethylenterephthalat. Online verfügbar unter https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Polyethylenterephthalat#google_vignette, zuletzt geprüft am 01.04.2021
- [CLA13]** Clarke, P. (2013): Butterflies fly on designer wings. Online verfügbar unter <https://creation.com/butterfly-designer-wings>.
- [DIR12]** Dirks, Jan-Henning; Taylor, David (2012): Veins improve fracture toughness of insect wings. In: *PLoS one* 7 (8), e43411. DOI: 10.1371/journal.pone.0043411.
- [DJI21]** DJI (Hg.): Mavic Air 2. Online verfügbar unter <https://www.dji.com/de/mavic-air-2/specs>, zuletzt geprüft am 10.03.2021.
- [DUD21]** Duden Learnattack GmbH (Hg.) (2021): Eiweiße (Proteine) - Aufbau und Eigenschaften. Online verfügbar unter <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/eiweisse-proteine-aufbau-und-eigenschaften>, zuletzt geprüft am 23.02.2021.
- [EIT21]** Eitner, Janis; Schneider, Karin: Solartechnik schön wie ein Schmetterlingsflügel. Messe BAU 2021: MorphoColor und geschindelte Photovoltaik-Zellen.
- [ENC00]** Enchantedlearning (Hg.) (2000): Butterfly Wing Anatomy. Online verfügbar unter <https://www.enchantedlearning.com/subjects/butterfly/anatomy/Wings.shtml>, zuletzt geprüft am 21.03.2021.
- [ENT21]** Entomologa (Hg.) (2021): Wings. Online verfügbar unter <http://www.entomologa.ru/outline/23.htm>, zuletzt geprüft am 17.03.2021.
- [FER20]** Ferenz, H. (2020): Baustoffe der Natur - Chitin. Hg. v. Halle Spektrum. Online verfügbar unter <https://hallespektrum.de/nachrichten/bildung/baustoffe-der-natur-chitin/366407/>.
- [FES21]** Festo Vertrieb GmbH & Co. KG (Hg.): Tripod EXPT. Online verfügbar unter https://www.festo.com/cms/de_de/13886.htm, zuletzt geprüft am 06.03.2021.
- [FLO15]** Floreano, Dario; Wood, Robert J. (2015): Science, technology and the future of small autonomous drones. In: *Nature* 521 (7553), S. 460–466. DOI: 10.1038/nature14542.
- [FOR14]** Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V. (Hg.) (2014): Spinnenseide: Stärker als
-

Stahl und elastischer als Nylon. Online verfügbar unter <https://www.biokon.de/spinnenseide-staerker-als-stahl-und-elastischer-als-nylon/>, zuletzt geprüft am 01.03.2021.

[FRO15] Frontzek, Heinrich; Knubben, Elias (2015): eMotionButterflies.

[FRO16] Frontzek, Heinrich; Knubben, Elias (2016): 3DCocooner.

[GIR08] Giraldo, Marco A. (2008): Butterfly wing scales: Pigmentation and structural properties: Advances in Insect Physiology.

[GOS99] Gosline, J. M.; Guerette, P. A.; Ortlepp, C. S.; Savage, K. N. (1999): The mechanical design of spider silk: from fibroin sequence to mechanical function. In: *The Journal of experimental biology* (202).

[GRE19] Gressner, Axel M.; Arndt, Torsten (2019): Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

[GRO15] Grotelüschen, F. (2015): Künstliche Spinnenseide. Online verfügbar unter https://www.deutschlandfunk.de/tolle-idee-was-wurde-daraus-kuenstliche-spinnenseide.676.de.html?dram:article_id=429034, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

[HAL21] Hall, N. (2021): The Lift Coefficient. Online verfügbar unter <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/liftco.html>, zuletzt geprüft am 23.03.2021.

[HEP21] Heppe Medical Chitosan GmbH (2021): Chitin. Online verfügbar unter <https://www.gmp-chitosan.com/de/produkte-service/chitin.html>, zuletzt geprüft am 27.03.2021.

[HIR08] Hiroto Tanaka, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama (2008): IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008 ; 22 - 26 Sept., 2008, Acropolis Convention Center, Nice, France. Piscataway, NJ: IEEE Service Center. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4637508>.

[KAR18] Karásek, Matěj; Mujires, Florian T.; Wagter, Christophe de; Remes, Bart D. W.; Croon, Guido C. H. E. de (2018): A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns. In: *Science (New York, N.Y.)* (6407), S. 1089–1094. DOI: 10.1126/science.aat0350.

[KIA19] Kiani-Kreß, R.; Salz, J. (2019): Lufthansa und BASF verpassen Flugzeugen eine Haifischhaut. Online verfügbar unter <https://www.wiwo.de/unternehmen/dienstleister/weniger-kerosinverbrauch-lufthansa-und-basf-verpassen-flugzeugen-eine-haifischhaut/25280450.html>, zuletzt geprüft am 26.03.2021.

[KLE11] Klein, Bernd (2011): Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung ; mit Tabellen sowie umfangreichen Übungsaufgaben zu allen Kapiteln des Lehrbuchs. 9., überarb und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium Grundlagen Konstruktion).

[KOV16] Kovač, Mirko (2016): Learning from nature how to land aerial robots. In: *Nature* 352 (6288), S. 895–896.

[KOV10] Kovalev, Igor (2010): From Butterfly to Wind Turbine. In: *Wind Engineering* 34 (4), S. 351–360. DOI: 10.1260/0309-524X.34.4.351.

[KÜN21] KünzlerBachmann Verlag AG (Hg.): Schmetterling. Online verfügbar unter <https://www.spick.ch/spickipedia/schmetterling/>, zuletzt geprüft am 12.03.2021.

[KUR11] Kurtulus, Dilek Funda (2011): Introduction to micro air vehicles: concepts, design and applications.

[LUM21] Lumitos AG (Hg.) (2021): Mylar. Online verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Mylar.html>, zuletzt geprüft am 15.03.2021.

[LUM21] Lumitos AG (Hg.) (2021): Polystyrol. Online verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Polystyrol.html#:~:text=Die%20Dichte%20von%20festem%20Polystyrol,ist%20glas-klar%2C%20hart%20und%20schlagempfindlich.>, zuletzt geprüft am 12.03.2021.

[MAJ15] Majumder, Soumyadip; Kaulaskar, Mahadev D.; Neogi, Sudarsan (2015): “Biosteel”: an exciting product from nature that is superior to many manmade alternatives. In: *Reviews in Chemical Engineering* 31 (5). DOI: 10.1515/revce-2014-0055.

[MEN11] Meng, Xue Guang; Xu, Lei; Sun, Mao (2011): Aerodynamic effects of corrugation in flapping insect wings in hovering flight. In: *The Journal of experimental biology* 214, S. 432–444. DOI: 10.1242/jeb.046375.

- [MIC10]** Michelson, Robert C. (2010): Overview of Micro Air Vehicle System Design and Integration Issues. In: *Encyclopedia of Aerospace Engineering*
- [NAC10]** Nachtigall, Werner (2010): *Bionik als Wissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [NAC13]** Nachtigall, Werner; Pohl, Göran (2013): *Bau-Bionik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [NAC13]** Nachtigall, Werner; Wisser, Alfred (2013): *Bionik in Beispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [NIC14]** Nick, P. (2014): Pflanze des Monats August: Riesen-Seerose (*Victoria cruziana*). Hg. v. KIT. Online verfügbar unter <https://www.botanik.kit.edu/garten/404.php>, zuletzt geprüft am 22.03.2021.
- [ORT17]** Ortega Ancel, Alejandro; Eastwood, Rodney; Vogt, Daniel; Ithier, Carter; Smith, Michael; Wood, Rob; Kovač, Mirko (2017): Aerodynamic evaluation of wing shape and wing orientation in four butterfly species using numerical simulations and a low-speed wind tunnel, and its implications for the design of flying micro-robots. In: *Interface focus* 7 (1), S. 20160087. DOI: 10.1098/rsfs.2016.0087.
- [PAR19]** Para Tech Coatings Ltd (Hg.) (2019): Parylene Coating. Online verfügbar unter https://www.paratechcoating.co.uk/?gclid=Cj0KCQjwutaCBhDfARIsAJHWnHuV3_IRZ-HTz_Rdfdn6X4k551rICnvW8Yi0QVZVM0f4mboDRCHTLg9YaAmD-EALw_wcB, zuletzt geprüft am 22.03.2021.
- [PET11]** Petricca, Luca; Ohlckers, Per; Grinde, Christopher (2011): Micro- and Nano-Air Vehicles: State of the Art. In: *International Journal of Aerospace Engineering*. DOI: 10.1155/2011/214549.
- [PIO21]** Pioneer Aircraft (Hsg.) (2021): Wer wir sind. Online verfügbar unter <https://www.pioneer-aircraft.de/ueber-uns/ueber-uns/>, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- [PLA19]** Platz, B. (2019): Seidenspinner: Von der Seide zum Super-Bio-Plastik. Hg. v. Bayerischer Rundfunk. Online verfügbar unter <https://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/seidenspinner-100.html>, zuletzt geprüft am 01.03.2021.
- [PFÄ10]** Pfändler, Werner (2010): Exklusiv. Die Gelehrten bestätigen es_ Ornithopter. Helling's Hubflügel halbiert den Energieverbrauch. In: *e-flight evolution* (3).
- [REP21]** Reporteur, S. (2021): Die Dichte von CFK ist sein Erfolgsrezept. Hg. v. publishing GmbH. Online verfügbar unter <https://www.hausjournal.net/cfk-dichte>, zuletzt geprüft am 10.03.2021.
- [RIC11]** Richter, Charles; Lipson, Hod (2011): Untethered hovering flapping flight of a 3D-printed mechanical insect. In: *Artificial life* (2), S. 73–86. DOI: 10.1162/artl_a_00020.
- [ROS20]** Rosenmaier, A. (2020): Die Sandwichbauweise - Leichtbau leicht gemacht! Hg. v. Hintsteiner Group GmbH. Online verfügbar unter <https://www.hintsteiner-group.com/blog/sandwichbauweise-leichtbau#step2>, zuletzt geprüft am 20.03.2021.
- [ROS05]** Rossmann, T.; Tropea, C. (2005): *Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. Darmstadt: Springer Berlin Heidelberg.
- [ROT16]** Rottner, Klemens (2016): CELL BIOLOGY. Formin' filaments at a faster CLIP. In: *Science (New York, N. Y.)* 352 (6288), S. 894–895. DOI: 10.1126/science.aaf9624.
- [SCH18]** Schaltz, M.; Mousset, A. (2018): Wie fliegen Schmetterlinge? Hg. v. Luxembourg National Research Fund. Online verfügbar unter <https://www.science.lu/de/insektenflug/wie-fliegen-schmetterlinge>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- [SCH21]** Scholz-Kessler, Andreas: Der Bienenflug in Zeitlupe. Online verfügbar unter <https://www.bienenpatenschaft.info/wissenswertes/wildbienen-suchen-jetzt-nach-nektar-2#:~:text=Die%20Fl%C3%BCgel%20der%20Bienen%20schlagen,jeden%20einzelnen%20Fl%C3%BCgelschlag%20ganz%20genau!>, zuletzt geprüft am 02.03.2021
- [SCI21]** ScienceDirect (Hg.): Micro Air Vehicle. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/micro-air-vehicle>, zuletzt geprüft am 28.02.2021
- [SEK17]** Sekimura, Toshio; Nijhout, H. Frederik (2017): *Diversity and Evolution of Butterfly Wing Patterns*. Singapore: Springer Singapore.
- [SIM21]** Simscale (Hg.) (2021): What is the Reynolds Number? Online verfügbar unter <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-is-the-reynolds-number/>, zuletzt geprüft am 28.02.2021

- [SHE04]** Shendarkar, A. D.; Jawale, L. S. (2004): BioSteel – A future fibre. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/289341985_BioSteel_-_A_future_fibre, zuletzt geprüft am 03.03.2021
- [SON13]** Song, Young Min; Xie, Yizhu; Malyarchuk, Viktor; Xiao, Jianliang; Jung, Inhwa; Choi, Ki-Joong et al. (2013): Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. In: *Nature* 497 (7447), S. 95–99. DOI: 10.1038/nature12083.
- [SPE21]** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (Hg.): Proteine. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/proteine/7563>, zuletzt geprüft am 22.02.2021.
- [SPR20]** Springer Reference (Hg.) (2020): Proteine, fibrilläre. Proteine. 46 Bände.
- [SRY02]** Srygley, R. B.; Thomas, A. L. R. (2002): Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies. In: *Nature* 420
- [STA15]** Stauß, O. (2015): Leichtbau bionisch – aber mit System. Hg. v. K.-V. R. GmbH. Online verfügbar unter <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/entwicklung/leichtbau-bionisch-aber-mit-system/>, zuletzt geprüft am 29.02.2021.
- [STE20]** Stegbauer, L. (2020): Vom Insektenpanzer zum Baumaterial: Bioinspirierte Werkstoffe aus Chitin. Hg. v. Universität Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.igvp.uni-stuttgart.de/institut/aktuelles/presseinfos/Vom-Insektenpanzer-zum-Baumaterial-Bioinspirierte-Werkstoffe-aus-Chitin>, zuletzt geprüft am 26.03.2021.
- [STO14]** Stoller, D. (2014): Freiburger „Knochendecke“ ist Vorbild für optimale Leichtbaukonstruktion. Hg. v. V. V. GmbH. Online verfügbar unter <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/architektur/freiburger-knochendecke-vorbild-fuer-optimale-leichtbaukonstruktion/>, zuletzt geprüft am 03.03.2021.
- [STU21]** StudyHelp GmbH (Hg.): Protein. Online verfügbar unter <https://www.studyhelp.de/online-lernen/chemie/protein/>, zuletzt geprüft am 23.02.2021.
- [TAN08]** Tanaka, H.; Hoshino, K.; Matsumoto, K.; Shimoyama, I. (2008): Flight dynamics of a butterfly-type ornithopter. In International Conference on Intelligent Robots and Systems
- [TAN08]** Tanaka, H.; Matsumoto, K.; Shimoyama, I. (2008): Design and Performance of Micromolded Plastic Butterfly Wings on Butterfly Ornithopter. In International Conference on Intelligent Robots and Systems
- [TAN10]** Tanaka, H.; Shimoyama, I. (2010): Forward flight of swallowtail butterfly with simple flapping motion. In: *IOP Publishing*.
- [TEC21]** Technische Universität Darmstadt (Hg.): Bionik im Bauwesen. Online verfügbar unter https://www.kgbauko.tu-darmstadt.de/forschung_kgbauko/aktuelle_forschungsvorhaben_kgbauko/mobile_learning_kgbauko/bionikimbauwesen_detail.de.jsp, zuletzt geprüft am 20.03.2021.
- [THE16]** ThermHex Waben GmbH (Hg.) (2016): Leichter Wabenkern aus Kunststoff. Online verfügbar unter <https://thermhex.com/de/leichter-wabenkern-aus-kunststoff/>, zuletzt geprüft am 19.02.2021.
- [VAL16]** Valerii, Darin (2016): Ornithopter; Patentnummer DE 20 2016 003 059 U1
- [VER21]** Vereinigung Mikrohamburg e.V. (Hg.): Schmetterlings unterm REM. Online verfügbar unter <http://www.mikrohamburg.de/HomeSchmetterlinge.htm>, zuletzt geprüft am 20.03.2021.
- [WET21]** Wetter, Michaela: Der Kolibri - ein Flugwunder. Online verfügbar unter <https://www.wissen.de/der-kolibri-ein-flugwunder>, zuletzt geprüft am 02.03.2021
- [WIE20]** Wiegold, T. (2020): Eurofighter als Rückgrat der Luftwaffe, US-Modell F-18 als „Brückenlösung“. Online verfügbar unter <https://augengeradeaus.net/2020/04/eurofighter-als-rueckgrat-der-luftwaffe-us-modell-f-18-als-brueckenloesung-zusammenfassung/>, zuletzt geprüft am 10.04.2020.
- [WIL21]** Willig, H.-P.: Werner Nachtigall. Online verfügbar unter https://www.biologie-seite.de/Biologie/Werner_Nachtigall, zuletzt geprüft am 27.02.2021.
- [WOL20]** Wollstadt, H. (2020): Welche Teilgebiete der Bionik für den Leichtbau relevant sind. Hg. v. Leichtbauwelt. Online verfügbar unter <https://www.leichtbauwelt.de/welche-teilgebiete-der-bionik-fuer-den-leichtbau-relevant-sind/>, zuletzt geprüft am 12.03.2021.
- [WOL19]** Wollstadt, H. (2019): Beispiele für Bionik im Leichtbau. Hg. v. Leichtbauwelt. Online verfügbar unter <https://www.leichtbauwelt.de/5-beispiele-fuer-bionik-im-leichtbau/>, zuletzt geprüft am 24.02.2021.
-

[ZAR13] Zare S.r.l. (Hg.) (2013): FullCure 720. Online verfügbar unter <https://www.zare.it/de/werkstoffe/fullcure-720>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.

[ZWE19] Zwerger, Patrick; Hoeveler, Patrick (2019): Top 10: Die größten Flugzeuge der Welt. Online verfügbar unter <https://www.flugrevue.de/zivil/die-riesen-der-luefte-top-10-die-groessten-flugzeuge-der-welt/>, zuletzt geprüft am 10.04.2021.

Autor:innen



Hannah Seibel hat 2019 ihr Bachelorstudium an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg mit dem Ausbildungspartner Pirelli Deutschland GmbH absolviert. Mit dem Bachelor in allgemeiner Mechatronik arbeitete sie zwei Jahre lang bei der Pirelli Deutschland GmbH in der industriellen Qualität und vollendete im September 2019 ihr berufsbegleitendes Masterstudium an der Wilhelm Büchner Hochschule. Aktuell arbeitet Sie bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt.



Prof. Dr.-Ing. Manfred Hahn ist seit September 2018 bei der WBH und vertritt den Maschinenbau im Bachelor- und Masterstudiengang, sowie den Bachelorstudiengang Maschinebau-Informatik. In der Lehre macht er sich in den analytischen Methoden der Technischen Mechanik und der Finite-Elemente-Methode stark. Im Weiteren liegen seine Kompetenzen in den analytischen Methoden des Leichtbaus und im Speziellen dem Faserverbundleichtbau. Studiert hat Herr Prof. Dr.-Ing M. Mahn Luft- und Raumfahrttechnik, weswegen er an der WBH außerdem dieses Gebiet mit in die Lehre einfließen lässt. Dazu gehören vor allem die Astronomie, die bemannte und unbemannte Raumfahrt und der Segelflug.

Ansprechpartner:innen

Prof. Dr.-Ing Manfred Hahn

Wilhelm Büchner Hochschule, Hilpertstrasse 31, D-64295 Darmstadt, Germany,

E-Mail: Manfred.Hahn@wb-fernstudium.de

Überblick über die Ausgaben der Schriftenreihe

Ausgabe 1 / 2022: **Christoph Sternberg, Ralf Isenmann**

Untersuchung regionaler Besonderheiten im Individualverkehr bei ausgewählten deutschen Smart-City-Projekten

Ausgabe 2 / 2022: **Fabian Fries, Manfred Hahn**

Dynamik von Doppelstern-Systemen

Ausgabe 3 / 2022: **Stefan Kaden, Ralf Isenmann**

IT based Framework facilitating Technology Roadmapping striving for Sustainability



**WILHELM BÜCHNER
HOCHSCHULE**

Mobile University of Technology

EINE HOCHSCHULE DER KLETT GRUPPE.

Die Wilhelm Büchner Hochschule versteht sich als innovative, interdisziplinär ausgerichtete Hochschule für Technik. Unsere Kernbereiche sind Ingenieurwissenschaften, Informatik, Wirtschaftsingenieurwesen und Technologiemanagement sowie Energie-, Umwelt- und Verfahrenstechnik.

Eine Basis für die kontinuierliche Weiterentwicklung von Studiengängen stellt die anwendungsorientierte Forschung unter Einbindung aller Fachbereiche dar. Forschung an der Wilhelm Büchner Hochschule beinhaltet sowohl fachspezifische als auch fernstudien- und weiterbildungsspezifische Themen.

Unser vollständiges Leitbild und weitere Informationen finden Sie unter

www.wb-fernstudium.de