



Inspiziert vom Zufall?

Schon lange holen sich Menschen Ideen aus der Natur, um Inspiration für die Suche nach Problemlösungen zu finden, so auch, um ihren Traum vom Fliegen zu verwirklichen. Es fing an mit Pionieren wie Leonardo da Vinci und Otto Lilienthal, die Vogelflug und Vogelflügel studiert hatten, um theoretisch oder experimentell unter Einsatz des eigenen Lebens mit nachgebauten Konstruktionen den Luftraum zu erobern. Heute gibt es schon ganze Wissenschaftszweige, die von der Natur lernen wollen, um Strukturen und Materialien mit neuen und ganz speziellen Eigenschaften zu erschaffen.

Hans- Bertram Braun

Quellen der Inspiration

In China gibt es ein dem Bildungsministerium unterstelltes „Key Laboratory of Bionic Engineering“, also eine Art Zentrallabor für einen der Biologie „abgeschauten“ Maschinenbau (SUN & BRUSHAN 2012). Weltweit findet man Labore für „Biomimetics“, Labore also, in denen Aspekte von Lebewesen untersucht werden, um die Technik voranzubringen, indem die Biologie nachgeahmt wird. In diesem Artikel geht es um Untersuchungen, die an der Christian-Albrechts-Universität in Kiel durchgeführt wurden und zwar in der Arbeitsgruppe *Funktionelle Morphologie und Biomechanik* am Zoologischen Institut. Es gibt sogar eine wissenschaftliche Zeitschrift mit dem Namen „Bioinspiration & Biomimetics“, speziell zur Veröffentlichung wissenschaftlich-technischer Artikel, die Inspiration aus der Biologie ziehen.

Es lohnt sich also ganz offensichtlich, nicht nur der eigenen Phantasie, Kreativität und Intelligenz zu vertrauen, wenn man neue Werkstoffe erschaffen will, oder intelligente Lösungen für technische Fragestellungen sucht, sondern als Quelle für Inspiration den Aufbau von Lebewesen detailliert zu studieren. Am oben erwähnten Institut in Kiel haben Wissenschaftler

sich speziell vom Aufbau des Libellenflügels inspirieren lassen, um Strukturen zu erschaffen, die drei verschiedene „eingebaute“ Festigkeitsstufen annehmen können, je nachdem welche Belastung gerade einwirkt.

Libellen sind faszinierende Lebewesen. Wahrscheinlich hat jeder sie schon einmal über die Wasseroberfläche von Teichen und Tümpeln huschen sehen. Sie können mit ihren vier Flügeln sehr schnell fliegen und dabei blitzschnell die Richtung ändern, um ihre Beute zu fangen. Dabei kann die Belastung der Flügel durch die gefangene Beute schlagartig enorm erhöht werden, ohne dass das Manövrieren eingeschränkt oder die Tragfähigkeit des Flugsystems beeinträchtigt werden würde. Libellen können gleitfliegen oder auf einer Stelle im Schwirrflug schweben. Auch weil sie relativ groß sind, sind Libellen und ihr Flugverhalten recht gut untersucht. Zuletzt auch im Zusammenhang damit, dass neuerdings großes Interesse daran besteht, miniaturisierte Flugroboter, sogenannte „MAV“s zu bauen (Micro Air Vehicles) bzw. für bestimmte Anwendungen zu optimieren. MAVs sollen z. B. zur Informationssammlung an unzugänglichen Orten aus zivilem oder militärischem Interesse eingesetzt werden können.

Faszinierendes Design

Die vier Libellenflügel werden an der körpernahen Basis muskulär unabhängig voneinander bewegt. Im Gegensatz zu Wirbeltier-Flügeln enthalten die Flügel selbst aber keine Muskulatur, so dass sie im körperfernen Bereich nicht aktiv verändert werden können, um Auftrieb und Flugverhalten zu beeinflussen. Fast alles, was an Drehung, Biegung, Krümmung der Flügel während des Auf- und Ab-Flügelschlags benötigt wird, wird deshalb durch Materialeigenschaften und Aufbau des Flügels erreicht. Libellenflügel sind sehr stabil und können verhältnismäßig hohen Belastungen standhalten. Sie bestehen aus Chitin-Membranen, die durch ein komplex verzweigtes Netzwerk von hohlen Chitin-Adern stabilisiert werden. Die Membran ist sehr dünn, besteht aber aus drei Lagen und wird durch eine Wachsschicht verstärkt, die nebenbei Wasser extrem gut abweist, so dass sie praktisch nicht benetzt werden kann. Ein kleiner Wassertropfen auf der Libellenmembran bleibt fast kugelförmig (SUN & BRUSHAN 2012).

Durch die extreme Leichtbauweise tragen die Flügel nur 2% zum Gesamtgewicht der Libelle bei. Im Vorderbereich der Flügel sind die umspannten Felder oft rechtwinklig, während sie im Hinterbereich sechs- oder vieleckig sind, was die gewünschte Verformbarkeit wie an dieser Stelle benötigt ermöglicht. Libellenflügel sind nicht völlig flach, sondern die spezifische Aderstruktur führt zu leichten Knicks und Faltungen im Flügel, die die Struktur verstärken und erstaunlicherweise bei den Flugbedingungen der Libellen für besseren Auftrieb sorgen, als es eine ganz flache oder eine wie ein Flugzeugflügel gewölbte Fläche tun würde. An der Umrandung der Flügel finden sich zusätzlich mikroskopisch kleine sägezahnartige Ausstülpungen, die die Aerodynamik beim Flügelschlag optimieren.

Die spezifische Anordnung der Faltungen führt auch dazu, dass der Flügel in verschiedene Richtungen elastisch reagiert. Die Chitin-Adern wirken dabei als Gelenke, die ein gewisses Maß an Auslenkung entlang ihrer Achse erlauben (Abb. 1A). An manchen Kreuzungen der Gelenk-Adern mit Queradern sitzen zusätzlich Fortsätze, die wie mechanische Stopper wirken (Abb. 1B). Wird der Flügel an dieser Stelle weiter ausgelenkt, stoßen die Fortsätze aneinander und nehmen als Stützen die zusätzliche Energie auf und erlauben eine weitere Auslenkung, aber unter stärkerem Widerstand des Flügels. Als Sollbruchstelle schließlich gibt es etwa in der Mitte der Flügelvorderkante eine Diskontinuität, den Nodus (Abb. 1C). Es ist eine Stelle, an der die Chitin-Adern ein verdicktes Gelenk bilden, das nicht fest verbunden ist. Diese Stelle wirkt als Stoß-Absorber, der verhindert, dass der

Flügel bei Kontakt mit einem Hindernis dauerhaft Schaden nimmt.

Übertragung in die Technik

Es gibt noch viele weitere offensichtlich oder erst nach eingehender Erforschung als höchst sinnvoll erkennbare Details in der Struktur der Libellenflügel, wie etwa das Stigma, eine Art Gegengewicht nahe der Flügelspitze, doch nur die letzten drei oben beschriebenen Strukturen wurden von der Kieler Gruppe in ein kleines Flugzeugmodell eingebaut: Mit Hilfe eines 3D-Druckers fertigten sie kleine Flugzeuge, deren Tragflächen drei verschiedene Festigkeiten zeigen, abhängig von der auf sie einwirkenden Kraft (Abb. 2): Die Verbindung zwischen Rumpf und Tragfläche wurde mit einer flexiblen Verbindung gestaltet, einer Lücke in der Tragflächenverstärkung. Das Kunststoff-Material des Flugzeugs hat eine gewisse Elastizität, so dass die Tragflächen sich zu einem gewissen Grad verbiegen können als Festigkeitsstufe 1. Mechanische Stopper an der Übergangsstelle von der Tragfläche zum Rumpf sorgen für die zweite Festigkeitsstufe, wenn die einwirkende Kraft dazu führt, dass die Tragfläche sich so biegt, dass der Stopper Kontakt mit dem Rumpf aufnimmt und die Tragfläche dadurch stärker stützt, so dass sie größere Belastungen tragen kann. Als „Nodus“-Struktur schließlich wurde eine Unterbrechung in der Tragfläche belassen, die mit einer verdünnten, stabil strukturierten Stützstruktur überbrückt wurde. Wenn das Flugzeug gegen ein Hindernis fliegt, so dass kurzfristig extreme Kräfte einwirken, gibt die Sollbruchstelle nach, die Tragfläche knickt kurz ein (Festigkeitsstufe 3), nimmt danach aber elastisch wieder die Ausgangslage ein; das Flugzeug ist

Abb. 1 Biologische Vorbildstrukturen (Merkmale von Libellenflügeln), um dreifache Festigkeit zu designen. (CC BY 4.0)

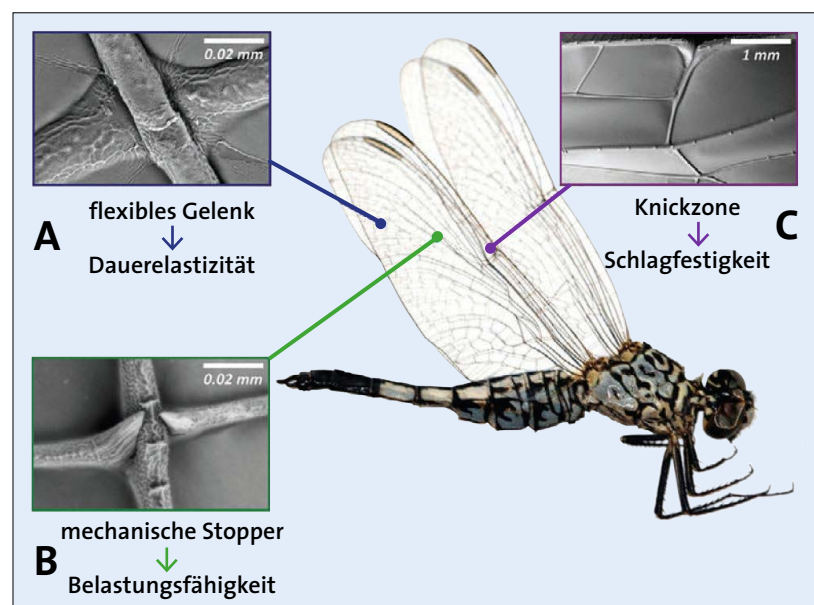
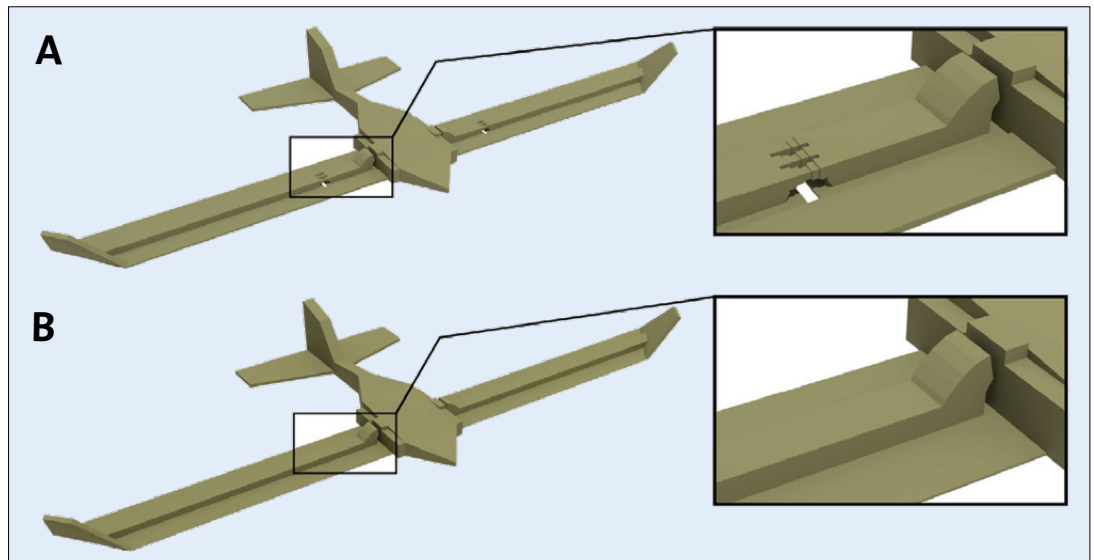


Abb. 2 Flugzeugmodelle (Oben Dreifach- und unten Doppel-Festigkeitsversion der Tragflächen) (CC BY 4.0)



noch intakt. Bei Vergleichsmodellen, die die „Nodus“-Struktur nicht besaßen, brachen bei Aufschlag auf ein Hindernis die Tragflächen ab. Vergleichsmodelle ohne flexible Verbindung leierten unter wiederholter Belastung aus, verloren also ihre Festigkeit. Modelle ohne mechanische Stopper konnten höheren Belastungen nicht widerstehen (KHAHESHI et al. 2021).

Diese flexiblen Festigkeitsstufen wurden erfolgreich nach dem Vorbild des Libellenflügels ins Material der Tragflächen designt. Es war dazu kein Regelkreis mit variablen Einstellungen nötig, um auf verschiedene Belastungen zu reagieren, was in Lebewesen ja durchaus auch vorkommt. Das Material selbst reagiert angepasst und unmittelbar, d. h. ohne Verzögerung.

Libellenflügel weisen ein optimales Design auf, das nur in seiner Gesamtheit (plus noch viele weitere „Zutaten“ wie Muskulatur, Elastizität des Exoskeletts, die großen Komplexaugen u.v.a.m.) die Flugakrobatik erlaubt, die eine Libelle für ihre typische Lebensweise braucht. Schwer vorstellbar, wie eine hypothetische „Proto“-Libelle sich mit Futter versorgt haben sollte, der einzelne Aspekte des komplexen Designs fehlten. Fossilfunde von Libellenflügeln, die auf mehr als 100 Millionen radiometrische Jahre datiert werden (BECHLY 2000), sehen aus wie Kopien von Flügeln heute lebender Libellen, weisen dieselbe Verteilung von Musterung, Nodus und Stigma auf und besaßen schon damals ein perfektes Design.

Was ist die Quelle der Inspiration?

Die hier zitierten technischen Artikel kommen, im Gegensatz zu vielen biologischen Artikeln, ganz ohne Verweise auf Evolution aus. Der vielzitierte Satz von DOBZHANSKY: „Nichts in der Biologie macht Sinn, außer im Licht der Evolution.“ erweist sich hier wie in vielen anderen

Nicht nur vom Wortsinn her ist es unsinnig, Bioinspiration aus den Ergebnissen geistloser Prozesse ziehen zu wollen.

Fällen als völlig falsch. Für einen Ingenieur, der die Biologie als Quelle der Inspiration für technische Anwendungen nutzt, ist es entweder unerheblich oder irreführend, Evolution als Ursache für perfekte und sinnvolle Prozesse und Strukturen in der Biologie anzunehmen. Nicht nur vom Wortsinn her (Spirit – Geist) ist es unsinnig, Bioinspiration aus Ergebnissen geistloser Prozesse (zufällige ziellose Änderungen und deren passive Selektion) ziehen zu wollen, die nach dem Evolutionsparadigma die „Ursache“ für alles sind, was an Leben existiert. Laut Richard DAWKINS, einem vehementen Verfechter der Evolutionstheorie, ist „Biologie ... das Studium komplizierter Dinge, die [nur] den Anschein haben, zu einem bestimmten Zweck entworfen worden zu sein.“ („Nur“ wurde hier eingefügt, um das korrekte Verständnis zu erleichtern.) Man kann vermuten, dass Ingenieure und Techniker, deren Job es ist, zweckvolle Strukturen oder Prozesse zu entwerfen, klarer als die evolutionsweltanschaulich eingeeengten Biologen erkennen, dass solche nie ohne Einsatz von Intelligenz und Planung zustande kommen.

Literatur

- SUN J & BHUSHAN B (2012) The structure and mechanical properties of dragonfly wings and their role on flyability. *Comptes Rendus Mecanique* 340, 3–17. doi:10.1016/j.crme.2011.11.003
- KHAHESHI A, GORB S & RAJABI H (2021) Triple Stiffness: A Bioinspired Strategy to Combine Load-Bearing, Durability, and Impact-Resistance. *Adv. Sci.* 8:2004338. doi: 10.1002/advs. 202004338
- BECHLY G (2000) Two new fossil dragonfly species (Insecta: Odonata: Anisoptera: Araripegomphidae and Lindeniidae) from the Crato Limestone (Lower Cretaceous, Brazil). *Stuttgarter Beitr. Naturk. Ser. B* Nr. 296.