

Antonia B. Kesel

Smarte Materialien – clevere Designs: Zukunftstechnologie aus der Innovations- werkstatt Natur

Zu allen Zeiten war das technologische Potential des Menschen sehr eng an die ihm zur Verfügung stehenden Werkstoffe geknüpft und nicht grundlos benennen die historischen Wissenschaften die Epochen menschlicher Kulturentwicklung nach den jeweils dominierenden Gebrauchswerkstoffen in Stein-, Bronze- und Eisenzeit. Wenngleich wir unsere eigene rezente Kultur als Informationszeitalter bezeichnen, werden Historiker künftiger Epochen wohl von der Siliziumzeit sprechen, welche am Ende des 2. Jahrtausends in das Zeitalter der smarten Materialien übergeht. Intelligente Werkstoffe, die sich den jeweiligen Anforderungen adäquat in Form und Funktion anpassen, indem sie ihre mechanischen und/oder chemischen Eigenschaften variieren – oft orientiert an natürlichen Vorbildern. Unser zunehmendes Know-how sowie die verfügbaren Analyse- und Synthesemethoden erlauben uns heute eine völlig neuartige Auseinandersetzung mit unserer Umwelt. Wir sind nicht mehr darauf beschränkt, der Natur im alltäglichen Kampf ums Überleben zu trotzen, ausgangs dieses Jahrtausends beginnen wir von der Natur in vielfältiger Weise zu lernen.

Das dabei zunehmend im Fokus stehende „Lernen von der Natur für eine potentielle anthropogene Anwendung“ ist Gegenstand der anwendungsorientierten Wissenschaftsdisziplin *Bionik*, im internationalen Sprachgebrauch *Biomimetics*. Ursprünglich zwischen Bio- und Ingenieurwissenschaften angesiedelt, umfaßt diese vom interdisziplinären Charakter geprägte Disziplin heute Physik, Mathematik, Informatik, Chemie, Pharmazie, Medizin, Materialwissenschaften, Elektrotechnik, Maschinenbau, Architektur bis hin zu Design und Psychologie. Im Spannungsfeld zwischen Material, Struktur und Funktion natürlicher Konstruktionen und Systeme gilt es, die hochkomplexen, hierarchischen Strukturen innerhalb eines mehrdimensionalen Umfeldes zu analysieren und hinsichtlich potentieller Applikationen zu bewerten. Standen innerhalb bionischer Forschungen vor wenigen Jahren noch Struktur- und Konstruktionsanalysen im Vordergrund, so ermöglichen neuerdings modernste Meßverfahren eine zunehmend detailliertere Charakterisierung natürlicher Materialien.

Analysen dieser Werkstoffe bis in den nanoskalierten Bereich hinein zeigen auf, daß es sich ausnahmslos um Komposite handelt, deren immenser Eigenschaftskatalog durch „clevere“ Anordnung der Grundbausteine erreicht wird. Dabei handelt es sich in der Regel lediglich um eine geringe Anzahl polymerer und keramischer Komponenten. Die daraus erzeugten Materialkonfigurationen offerieren über die chemischen hinaus physikalische Charakteristika, welche ihrerseits neue Funktionen implizieren. Aufzeigbar an jedem nahezu beliebigen Organismus oder dessen Teilen, imponieren die mehrdimensionalen Funktionsoptionen, die sich aus der Interaktion der Materialien und des daraus realisierten Designs ergeben. Das enorme Innovationspotential, das die Analyse der zugrundeliegenden Organisationsprinzipien sowie der Interaktionseffekte zwischen Material, Struktur und Funktion beinhaltet, läßt sich heute lediglich erahnen.

Am Beispiel: Die ultraleichten Tragflächen der Insekten

Aus extraterrestrischer oder zumindest nichtanthropogener Sicht, sind die Insekten die wahren Herrscher des 3. Planeten unseres Sonnensystems. Die ältesten fossilisierten Hinweise dieses Taxons datieren in das geologische Zeitalter des Devon (vor ca. 400 Millionen Jahren). Mit der Evolution der Flugfähigkeit kam es dann im Karbon und Perm zu einer Explosion der Formendiversität (Campbell 1998). Heute bevölkern mehrere Millionen Insektenpezies die Erde, die meisten davon sind flugfähig.

Ihre Flügel sind hochgradig spezialisierte Flugorgane, welche jeweils an das speziesspezifische Flugverhalten adaptiert sind. Allen Insektenflügeln gemeinsam ist, daß die dünnhäutigen Leichtbaukonstruktionen aus mechanischer Sicht, sowohl Struktur als auch Mechanismus darstellen und somit einer Vielzahl von Lastfällen und Lastfallkombinationen konstruktiv Rechnung tragen müssen. Unter anderem muß die Flügel-Struktur die durch die Eigenmasse induzierten Gewichtskräfte sowie die über das Flügelgelenk übertragene Kontraktionskraft der Flugmuskulatur kompensieren. Der Flügel-Mechanismus beschleunigt hingegen das umgebende Fluid dergestalt, daß die resultierenden aerodynamischen Kräfte den Flug des Insektes ermöglichen. Härtestes Optimierungskriterium ist dabei eine energieeffiziente Kinematik, was einen ausgeklügelten sensorischen Kontrollmechanismus voraussetzt. Ebenfalls aus energetischen Gründen ist darüber hinaus Leichtbauweise gefordert. Dabei repräsentieren die sich durch eine hohe Stabilität und enorme Belastbarkeit auszeichnenden Flügel lediglich 1–2% der Gesamtkörpermasse. Um die hohen mechanischen Belastungen während des Fluges bei minimalem Materialaufwand zu kompensieren, kommt sowohl dem verwendeten Werkstoff als auch dessen Anordnung entscheidende Bedeutung zu.

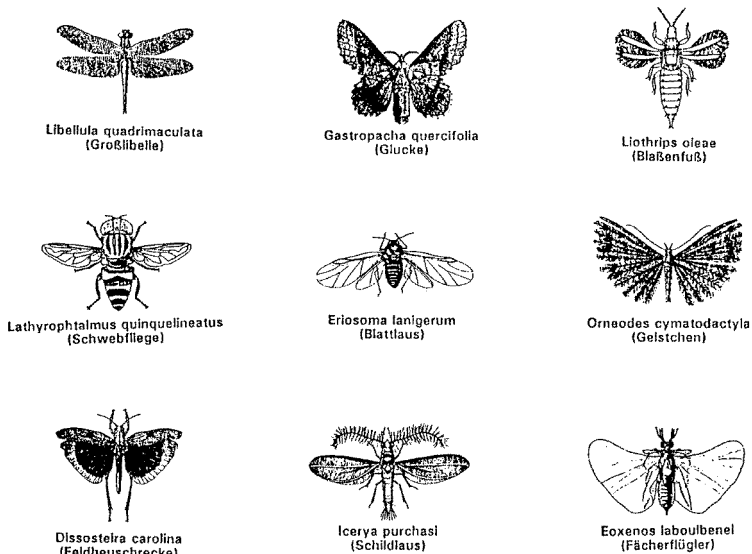


Abb. 1: Die Diversität der Insekten drückt sich neben Körperform und -größe nicht zuletzt in der Form ihrer Flügel aus. Sie ist deutlich mit der Körpergröße korreliert. Während Libellen, mit einer Spannweite von bis zu 160 mm über echte Tragflächen verfügen, weisen die Flügel kleinerer Insekten, wie etwa der Blasenfüße (Spannweite 1–2 mm), borstenbesetzte „Ruder“ auf. (aus Kesel 1995, nach Nachtigall)

Das Material

Der verwendete Werkstoff ist die Kutikula, die sowohl Außenhaut als auch Außenskelett darstellt und mit zu den beeindruckendsten natürlichen Materialien zählt. Sicherlich verdankt die Klasse der Insekta ihren evolutiven Erfolg nicht zuletzt diesem „Faser-in-Matrix-Werkstoff“, der sich chemisch aus zwei Hauptkomponenten zusammensetzt: dem langkettigen Polysaccharid Chitin und einer Vielzahl struktureller Proteine, die das Matrix-Material bilden. Darüber hinaus sind Lipide, Pterine und Melanin vorhanden.

Auf molekularer Ebene werden die mechanischen Eigenschaften durch die Ausbildung von Querverbindungen (Sklerotisierung bzw. Gerbung) zwischen den Proteinen bzw. zwischen Proteinen und Chitin oder Lipiden dominiert. Eigenschaften wie Elastizität, Steifigkeit und Härte werden zudem durch das kristalline Polymer Chitin, welches in fibrillärer Form in die Matrix eingebettet ist, beeinflusst. Die unterschiedliche Orientierung dieser Fibrillen in übereinanderliegenden Schichten induziert

zudem eine „sperrholzartige“ Anordnung mit analogen mechanischen Eigenschaften (Neville 1975, Waterhouse und Norris 1980).

Das in seiner Molekularstruktur der Zellulose vergleichbare Chitin, ist chemisch gesehen ein durch $\beta(1-4)$ -glykosidische Bindungen verknüpftes Poly-N-Acetyl-D-Glucosamin. Jeweils 18 bis 20 Chitinmoleküle bilden Mikrofibrillen aus, die wiederum zu „Mikrofasern“ mit einem Durchmesser von 10–30 nm aggregieren. Diese Fasern bestimmen nun ihrerseits maßgeblich die elastischen Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffes Kutikula (Rudall 1963, Vincent 1980, Filshie 1982).

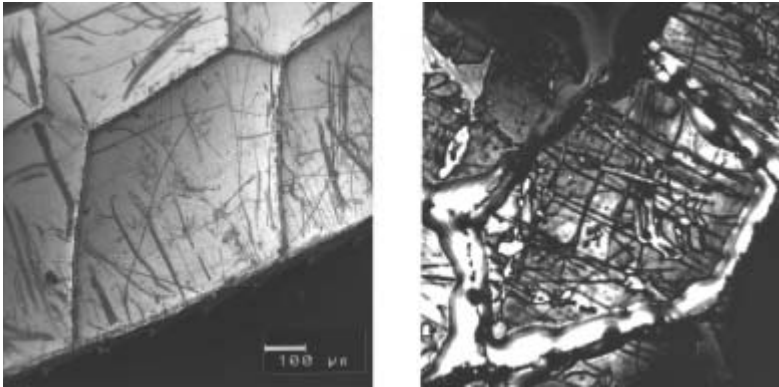


Abb. 2: Raster-Elektronen-Mikroskopische (REM) Darstellung der Flügelmembran (links). Zwar sind deutlich Kratzspuren in der aufliegenden dünnen Wachsschicht der Membran zu erkennen, es werden aber keine systematischen Strukturen abgebildet. Die Darstellung aus der Akustik-Mikroskopie (rechts) zeigt dagegen deutliche kreuzverspannte Faserstrukturen auf. Da diese im REM-Bild nicht sichtbar werden, handelt es sich nicht um topographische Strukturen sondern um unterschiedliche Materialeigenschaften (Dichte) innerhalb des Membranmaterials. (aus Kesel 1998, REM-Photo: P. Kreuz, Akustikbild: W. Arnold)

Die Anwendung modernster Analyse- und Testverfahren der Ingenieurwissenschaften ermöglicht inzwischen zumindest rudimentäre Einsichten in den physikalischen Eigenschaftskatalog dieses hochkomplexen Werkstoffes. Zwar liefern hochauflösende optische Verfahren, wie die Raster-Elektronen-Mikroskopie, Einsichten in die Topographie bzw. das Design eines Objektes, aber erst die Anwendung analytischer Verfahren wie die Akustik-Mikroskopie bieten zusätzlich Informationen über die Materialdichte bzw. den Dichtegradienten innerhalb eines Objektes (Abb. 2). Hier lassen sich selbst innerhalb der ultradünnen, nur

wenige Mikrometer starken Flügelmembranen integrierte Mikrosysteme aufzeigen. Kreuzverspannte, faserartige Strukturen, die an den membranbegrenzenden Rahmenadern ansetzen und durchaus als stabilitätsrelevante Mikroelemente interpretierbar sind (Kesel 1998, Gorb et al. Im Druck).

Unter Anwendung der Raster-Kraft-Mikroskopie lassen sich diese Elemente durch die Ermittlung der Kenngrößen Elastizität und Härte quantitativ charakterisieren. Allerdings zeigt dieses Verfahren auch einmal mehr die Grenzen des derzeit Machbaren auf. Die Methode liefert lediglich Meßwerte in einer Raumrichtung senkrecht zur Oberfläche, am Beispiel des Insektenflügels somit senkrecht auf die Flügelfläche. Die strukturstabilisierende Kompensation von Zugkräften bzw. Spannungen ist jedoch innerhalb der Flügelebene zu erwarten (Kreuz et al. 1998).

Einmal mehr zeigen die Befunde, daß natürliche Werkstoffe, im Gegensatz zu technischen, niemals als homogenes Material vorliegen, sondern auf allen Skalierungsebenen als hierarchisch organisierte Struktursysteme interpretiert werden müssen. Um der hochgradigen Anisotropie, der richtungsabhängigen Eigenschaften des Werkstoffs Rechnung zu tragen, ist daher zunächst die Konzeption völlig neuartiger Meßverfahren notwendig.

Die Struktur

Analoges gilt für die Analyse der mechanischen Charakteristika der Gesamtstruktur. Bedingt durch deren Komplexität liefern experimentelle Ansätze zumindest derzeit keine befriedigenden Ergebnisse. Um dennoch erste Einblicke in die Bedeutung des Designs hinsichtlich der Stabilität und damit der Funktionsrealisierung zu erhalten, wurde ein numerisches Simulationsverfahren, die Finite Element Methode (FEM) angewendet (z.B. Kesel 1997, Kesel et al. 1998).

Diese in den Ingenieurwissenschaften seit langem erfolgreich verwendete Methode ist für eine Reihe biologischer Fragestellungen insbesondere aus dem Themenbereich der Biomechanik adäquat, um Teilstrukturen in deren mechanischer Bedeutung für das übergeordnete Ganze besser beschreibbar und begreifbar zu machen. Dazu wird die geometrische Struktur in geeignete Einzelemente gerastert. Über komplexe Matrizenrechnungen sind sowohl Verformungsanalysen als auch eine Beurteilung der im Modell unter definierten Belastungssimulationen auftretenden Spannungszustände möglich. Wenngleich auch für diese Art der Modellbildung – wie für alle anderen – gilt, daß deren Erklärungsgehalt

jeweils kritisch zu überprüfen ist, so erlaubt sie doch die Variation einzelner Parameter und damit das Erfassen deren Wirkweise innerhalb des Modells. Traditionellen Vorgehensweisen der Biologie ist das Herausgreifen und Variieren singulärer Parameter aufgrund der immer gegebenen individuellen Variabilität vieler Einflußgrößen so nicht möglich. Die Variation einzelner Modellparameter wie etwa der Geometrie, der Materialmenge, der Materialanordnung etc., sowie einzelner Materialkonstanten (z.B. Elastizität, Dichte) ermöglichen damit Prognosen über das potentielle Verhalten der Originalstruktur unter definierter Belastung.

Bereits in erster Näherung erweist sich der Insektenflügel als hochgradig komplexe Konstruktion, so daß die Erstellung eines mehrstufigen Modells zur Klärung der Rolle einzelner Konstruktionselemente notwendig ist. Die als Modellvorlage dienenden Flügel der Großlibellen (*Anisoptera*) sind zwar modelltechnisch besonders aufwendig, Anisoptera sind jedoch zum Gleitflug befähigt, was in der ersten Phase des Modellierens die Simulation einer relativ einfachen Belastungssituation ermöglicht: Die Eigenmasse des Tieres wirkt senkrecht von unten auf die Tragfläche ein.

Die zunächst zweidimensionale Konfiguration des virtuellen Flügels zeigt deutlich, daß das System mit diesem Design nicht funktionsfähig wäre. Und in der Tat handelt es sich bei Insektenflügeln nicht um ebene flächige Platten, ihr Querschnitt weist eine deutliche Zick-Zack-Konfiguration auf (Hien et al. 1996). Die Integration der realen, dreidimensionalen Topographie erhöht erwartungsgemäß die Strukturstabilität drastisch (Abb. 3). Hier wird, analog zu technischen Wellblechkonstruktionen, bei gleichbleibender Materialmenge eine Stabilitätszunahme um das Zwanzigfache erreicht.

Einfache simulationstechnische Experimente zeigen auf, daß eine weitere Reduktion des Adernetzes, und damit der Materialmenge, unter Beibehaltung der Flügelgeometrie mit erheblichem Stabilitätsverlust einhergeht. Das legt zumindest die Vermutung nahe, daß die im Verlauf der Phylogenese der Anisoptera aufzeigbare Reduktion des Adernetzes bzw. des Materialaufwandes hier seine Grenzen erreicht hat. Darüber hinaus verdeutlicht die Variation einzelner Parameter, daß neben dem Strukturdesign eine Vielzahl von Detailstrukturen und Subelementen notwendig ist, um eine ausreichende Stabilität der Tragfläche zu erzielen: Die Zick-Zack-Konfiguration des Querschnitts wird durch die Integration von Versteifungselementen konserviert (Abb. 4), Spannungsspitzen werden durch integrierte Dämpfungselemente reduziert und auch die faserverstärkten, dünnhäutigen Membranen tragen in ihrer Gesamtheit deutlich zur Strukturstabilität bei (z.B. Wootton 1992, Kesel 1997, Kesel et al. 1996, 1998)

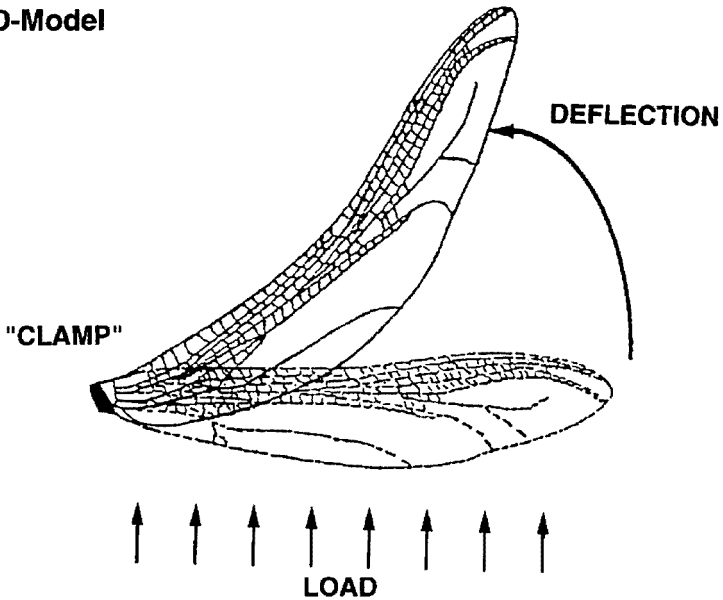
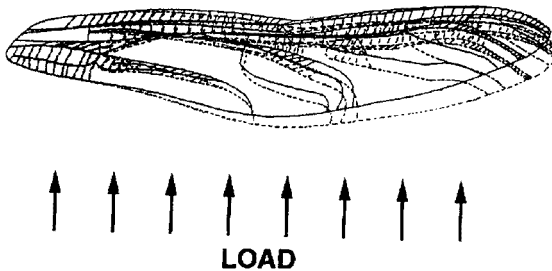
2D-Model**3D-Model**

Abb. 3: Simuliertes Strukturverhalten des zweidimensionalen FE-Modells unter virtueller Belastung (oben). Deutlich wird die enorme Auslenkung des Modells – das Insekt wäre mit dieser Tragfläche nicht flugfähig. Durch die Integration der realen Querschnittstopographie (unten) wird die Modellauslenkung drastisch reduziert (Faktor 20). Die Belastung greift als homogene Flächenlast senkrecht von unten an. Das Flügelgelenk wird als simple Einspannvorrichtung interpretiert. (nach Kesel 1997)

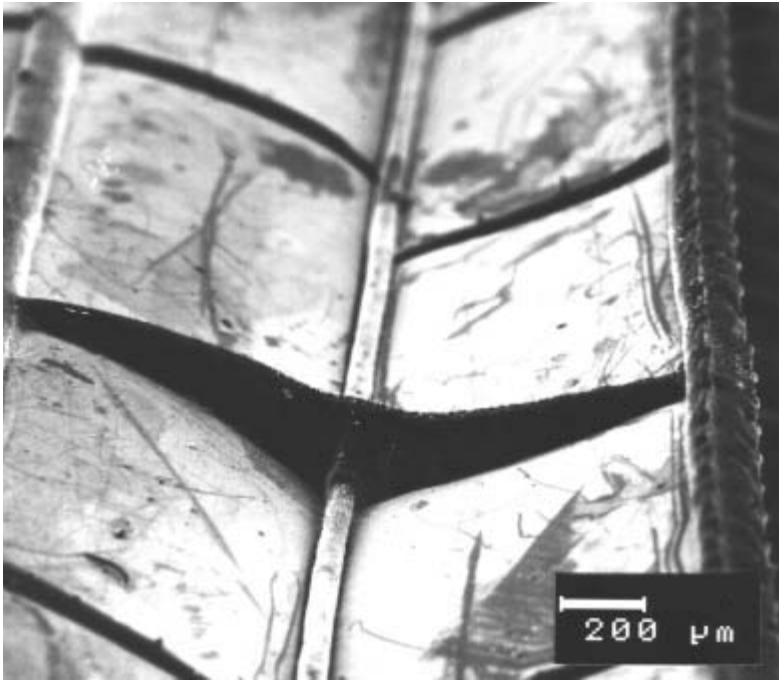


Abb. 4: REM-Aufnahme eines Versteifungselementes im frontal-proximalen Bereich des Flügels. Diese Mikrostrukturen stabilisieren die Zick-Zack-Konfiguration und konservieren die Querschnittsgeometrie des Flügels unter Belastung. (Photo: A. Wisser)

Die Analysen zeigen zudem, daß die meisten Strukturen oder Substrukturen des Flügels multifunktional konfiguriert sind. So schützt etwa die umlaufende Flügelrandader vor Verletzung. Darüber hinaus weist ihr dreieckiger Querschnitt gegenüber einer runden Alternative eine höhere Biegesteifigkeit auf. Die durch diese Querschnittsgeometrie ebenfalls bedingte Reduktion des Torsionswiderstandes erleichtert die Verwindung des Gesamtsystems um seine Längsachse während des Schlagfluges. Aus aerodynamischen Theoriebetrachtungen ergibt sich hieraus eine effizientere Energieausbeute (Ennos 1988).

Die Funktion

Wie eingangs erwähnt, kann die Flugfähigkeit als die Schlüsselinnovation innerhalb der Evolution der Insekten interpretiert werden. Sie ermöglichte eine weltweite Verbreitung und Besiedlung aller Biotope. Nach wie vor sind die phylogenetischen Ursprünge umstritten, sicher scheint jedoch, daß die heute aktiv beweglichen Flugorgane ihren Ursprung in der tragflächenartigen Verbreiterung lateraler Ausstülpungen des Exoskelettes haben, die ursprünglich wohl lediglich zum Gleitflug befähigten. Mit anderen Worten, die Flugfähigkeit der Tiere geht nicht zu Lasten der Extremitäten, wie etwa bei Vögeln und Fledermäusen, deren Vorderextremitäten an Funktionsoptionen zugunsten der Flügel einbüßen.

Libellen, als sehr ursprüngliche Vertreter der Insekten, sind, neben all den akrobatischen Flugmanövern, die ihr getrenntes Doppelantriebssystem ermöglicht, nach wie vor zum Gleitflug befähigt. Das erlaubt neben einer vereinfachten Statikbetrachtung auch eine sehr stark vereinfachte Analyse der stationären Aerodynamik unter Vernachlässigung aller im Schlagflug essentiellen instationären Effekte.

Für nahezu alle Flugsituationen gilt, daß die Flügel das sie umgebende Fluid beschleunigen und daraus die zum Flug notwendigen aerodynamischen Kräfte Auftrieb und Vortrieb resultieren. Darüber hinaus wird der sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzende Widerstand erzeugt. Die aerodynamische Performance eines Tragflächen-Systems läßt sich aus dessen Auftrieb-Widerstands-Verhältnis ablesen.

Die aerodynamischen Charakteristika des Libellenflügels werden durch die Überlagerung von mindestens zwei Effekten dominiert: einerseits weist das Flügelrelief eine deutliche Wölbung auf, andererseits wird diese Wölbung durch Knicke und Kanten überformt (Abb. 5). Unter Berücksichtigung des relevanten Geschwindigkeits- bzw. Dimensionsbereichs erzeugt sowohl eine gewölbte als auch ein geknickte Geometrie gegenüber einer flachen Platte ein höheres Auftrieb-Widerstands-Verhältnis, kann also als aerodynamisch günstiger bezeichnet werden (z.B. Rees 1975, Nachtigall 1977, Newman et al. 1977, Ellington 1984, Azuma und Watanabe 1988, Okamoto et al. 1996).

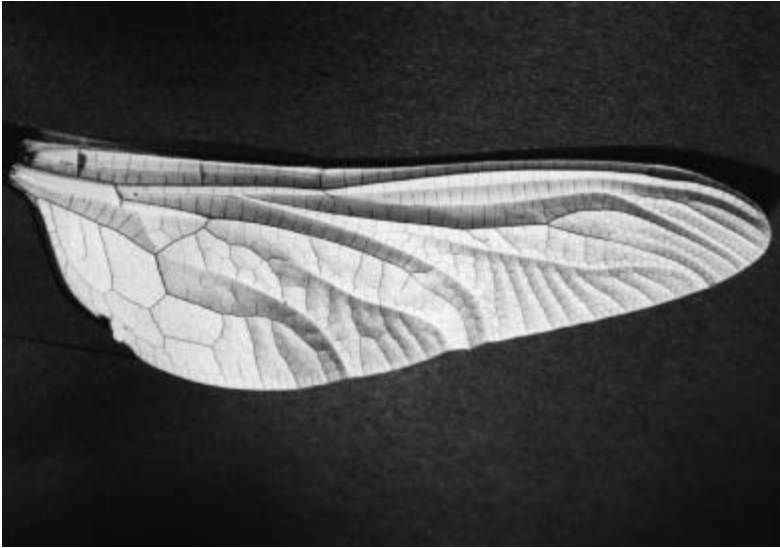


Abb. 5: Hinterflügel einer Großlibelle (Anisoptera), deutlich sind die Knicke und Kanten des Flügels zu erkennen, ebenso die Versteifungselemente an der Gelenkbasis (vgl. Abb. 4.) Zur Kontrastverstärkung wurde die Flügeloberseite mit weißer Farbe besprüht. (Photo: K. Hien)

Visualisierungsexperimente an Profilmodellen und fluiddynamische Simulationen zeigen, daß sich in den „Tälern“ des geknickten Profils stationäre Wirbelwalzen ausbilden. Die auftriebserhöhenden und widerstandsvermindernden Effekte werden durch Unterdruckzonen in den rotierenden Walzen induziert. Deren Saugwirkung arbeitet den tendenziellen Ablösebestrebungen des Fluids entgegen (Hien et al. 1996, Kesel 1997, Kesel und Roth 1998). Da der Auftrieb unter anderem mit der Laufstrecke des Fluides am Strömungskörper korreliert, kann dadurch die Auftriebserhöhung erklärt werden. Inwieweit diese Effekte auch während des Schlagfluges auftreten, bei dem zusätzlich instationäre Effekte hinzukommen, bleibt zu klären.

Analog zur Statik wird auch die aerodynamische Performanz der Tragfläche ganz entscheidend durch eine Reihe von Substrukturen geprägt. So wirken die scharfen, gezähnten Kanten der dreieckigen Frontader (Abb. 6) für das umströmende Fluid als Turbulenzgeneratoren, die das Auftrieb-Widerstands-Verhältnis deutlich verbessern.

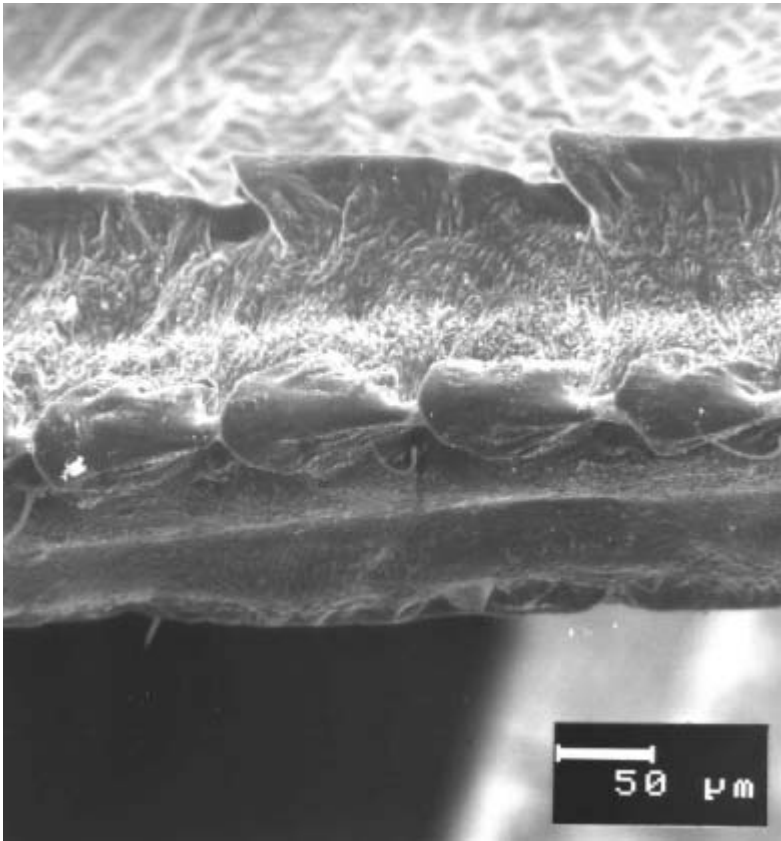


Abb. 6: REM-Aufnahme der Vorderkante (Frontader) eines Libellenflügels (*Aeshna cyanea*). Über die dreieckige Querschnittsgeometrie hinaus weist die Ader eine deutlich erkennbare Sägezahnstrukturierung auf. (Photo: P. Kreuz)

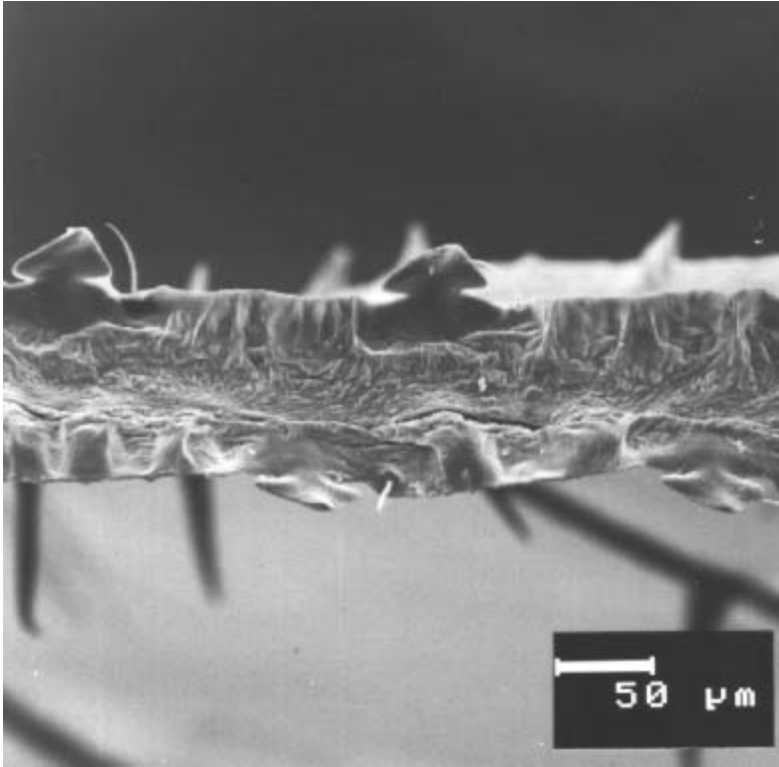


Abb. 7: REM-Aufnahme der Hinterkante eines Libellenflügels. Auch hier ist die Dreiecksgeometrie zusätzlich durch Mikrostrukturen überformt. Neben diesen in „Pick-As“-Form ausgestalteten Turbulenzgeneratoren sind deutlich haarförmige Strömungssensoren zu erkennen. (Photo: P. Kreuz)

Gleiches gilt für die Flügelhinterkante (Abb. 7), hier induziert die Kantengeometrie ein energetisch günstiges Ablösen der Strömung von der Tragfläche. Interessanterweise lassen sich diese Effekte, Widerstandsreduktion bei gleichzeitigem Auftriebsgewinn, nicht nur im für den Insektenflug relevanten Größen- bzw. Geschwindigkeitsbereich aufzeigen. Vergleichbare Untersuchungen an technischen Tragflächen zeigen, daß die beschriebenen Effekte innerhalb großer Bereiche Gültigkeit zu haben scheinen, was die Applikation dieser „cleveren“ Mikrostrukturen in technische Systeme möglich erscheinen läßt. In zukünftigen Untersuchungen werden vor allem diese Optionen zu berücksichtigen sein.

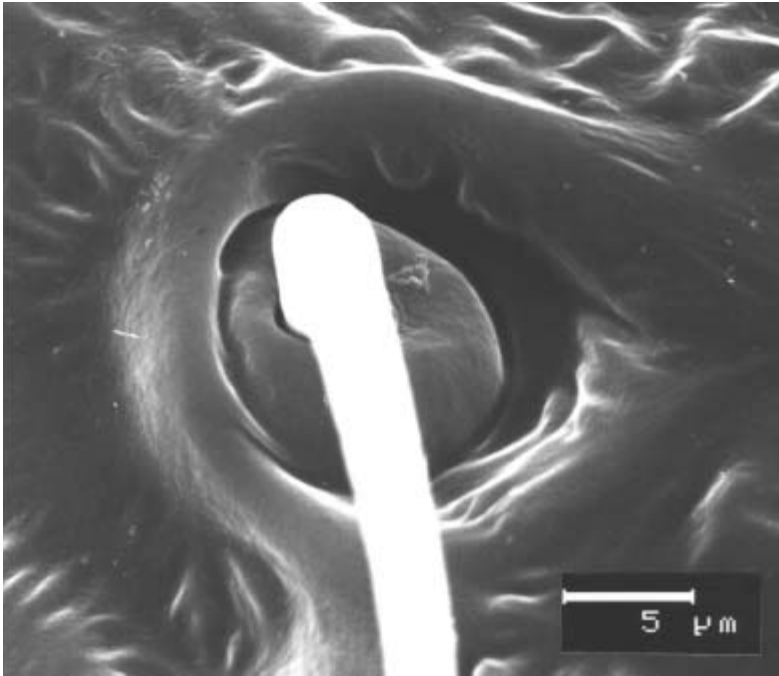


Abb. 8: Detailvergrößerung eines Mechanosensors an der Flügelkante von *Aeshna cyanea*. Diese Sensille reagieren auf strömungsinduziertes Auslenken. Inwieweit hierbei eine Frequenzabhängigkeit gegeben ist, wird derzeit überprüft. (Photo: P. Kreuz)

Im Fokus stehen jedoch nicht nur die aerodynamisch wirksamen Strukturen sondern auch die den Flug kontrollierende Sensorik. Exemplarisch für eine Vielzahl von Sensoren, die den übergeordneten Steuereinheiten permanent Informationen über die Umströmungssituation liefern, seien hier die Mechanorezeptoren an der Flügelhinterkante erwähnt (Abb. 8). Vergesellschaftet mit den Turbulenzgeneratoren wird deren Wirksamkeit in jedem Augenblick des Fluges registriert. Ein Hinweis auf die immense Bedeutung eines günstigen Ablösevorgangs an der Kante – zumindest für die Energetik des Fluges.

Resümee

Losgelöst vom Beispiel Insektenflügel treten uns in der Natur eine unübersehbare Vielfalt an smarten, intelligenten Werkstoffen entgegen. Immer handelt es sich dabei um hierarchisch strukturierte Systeme, hierin unterscheiden sich natürliche Werkstoffe von ihren künstlichen Pendanten. Um jedoch das Leistungsspektrum der natürlichen Materialien erreichen zu können, gilt es, dieses Konstruktionsprinzip zu realisieren.

In vielen Fällen ermöglicht entsprechendes Instrumentarium heute über das einfache „Lernen von der Natur“ hinaus bereits eine funktionsorientierte Synthese neuer Material- und Strukturdesigns. Etwa künstliche Moleküle, die in ihrer Performanz – z.B. in der Katalyse enzymatischer Prozesse oder im zielgerichteten Transport durch Membranen – mit ihren natürlichen Vorbildern in Konkurrenz zu treten vermögen. Intelligente Werkstoffe mit „programmierten“ Eigenschaftskatalogen ermöglichen die Realisation aufwendiger, multifunktionaler Strukturen und Systeme und machen gleichzeitig aufwendige Systemkontrollen in weiten Bereichen überflüssig. Hier schließt sich der Kreis von der Systemkontrolle zum Nanodesign.

Die Analyse natürlicher Konstruktionen resultiert in den seltensten Fällen in einfach zu kopierenden Konstruktionsskizzen. Im Gegenteil, oftmals sind die realisierten Konzepte wenig überzeugend und lassen sich lediglich aus ihrer Historie, dem Evolutionsprozeß, erklären. Aber sie zeigen die Machbarkeit auf. Selbst unter Einbeziehung multipler Optimierungskriterien in einem mehrdimensionalen Spannungsfeld lassen sich funktionstüchtige Lösungskonzepte realisieren. Damit dienen die natürlichen Vorlagen gleichermaßen der Schulung wie Herausforderung anthropogener Kreativität. Angesichts der hochkomplexen Organisationsstrukturen müssen Einzeldisziplinen in ihrem Versuch, von der Natur für eine potentielle Anwendung zu lernen, nahezu zwangsläufig versagen. Hier ist der inter- und transdisziplinäre Diskurs unabdingbar. Das erfordert die Konzeption neuer Kommunikationsmodelle ebenso wie die Anwendung des Methodenkanons aller uns heute und in Zukunft zur Verfügung stehenden Wissenschaftsdisziplinen – und mag (und sollte!) sich in nicht allzu ferner Zukunft auf die derzeit existierenden Bildungsinhalte und -konzepte auswirken.

Literatur

- Azuma A., Watanabe T. (1988): "Flight Performance of a Dragonfly". *The Journal of Experimental Biology* 137: 221–252.
- Campell N.A. (1998): *Biologie*, hg. v. J. Markl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Ellington C.P. (1984): "The Aerodynamics of Hovering Insect Flight." *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B 305: 79–113.
- Ennos R. (1988): "The Importance of Torsion in the Design of Insect Wings." *The Journal of Experimental Biology* 140: 137–160.
- Filshie B.K. (1982): "Fine Structure of the Cuticle of Insects and other Arthropods." In: *Insect Ultrastructure*, hg. v. R.C. King und H. Akai. New York: Plenum Press. 281–312.
- Gorb S.N., Kesel A.B., Berger J. (im Druck): Microsculpture of the Wing Surface in Odonata: Evidence for Cuticular Wax Coverage.
- Hien K., Kesel A.B., Wedekind F., Nachtigall W. (1996): "Visualisation and Analysis of the Airflow Around Insect Wing Profiles (Odonata)." *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft* 89.1: 214.
- Kesel A.B. (1997): „Einige Aspekte zur Statik der Insektenflügel.“ *Lokomotion in Fluiden. BIONA Report* 11: 89–114, hg. v. A. Wisser, D. Bilo, A.B. Kesel und B. Möhl). Stuttgart: Fischer.
- Kesel A.B. (1998): „Biologisches Vorbild Insektenflügel – Mehrkriterienoptimierung ultraleichter Tragflächen.“ *Technische Biologie und Bionik 4. BIONA Report* 12: 107–117, hg. v. W. Nachtigall und A. Wisser. Fischer, Stuttgart.
- Kesel A.B., Nachtigall W. (1998): „Aerodynamische Effekte unterschiedlicher Vorderkantengeometrien bei ultraleichten biologischen Tragflächen.“ *Biologie und Bionik 4. BIONA Report* 12: 323–324, hg. v. W. Nachtigall und A. Wisser. Stuttgart: Fischer.
- Kesel A.B., Roth A. (1998): „Aerodynamische Auswirkung der Oberflächentopologie biologischer Tragflächen im unteren Reynoldszahl-Bereich.“ *Biologie und Bionik 4. BIONA Report* 12: 325–326, hg. v. W. Nachtigall und A. Wisser. Stuttgart: Fischer.
- Kesel A.B., Philippi U., Kreuz P. (1996): „Dämpfungselement Nodus – Eine numerische Funktionanalyse.“ *Technische Biologie und Bionik 3. BIONA Report* 10: 186–187, hg. v. W. Nachtigall und A. Wisser. Stuttgart: Fischer.
- Kesel A.B., Philippi U., Nachtigall W. (1998): "Biomechanical Aspects of Insect Wings – an Analysis Using the Finite Element Method." *Computers in Biology and Medicine* 28: 423–437.

- Kesel A.B., Philippi U., Nachtigall W. (1995): "Statical Influence of 3d-Profile in Insect Wings." *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft* 88.1: 165.
- Kreuz P., Kempf M., Kesel A.B., Göken M., Vehoff H., Nachtigall W. (1998): „Materialwissenschaftliche Analyse der Insektenkutikula am Beispiel Libellenflügel.“ *Biologie und Bionik 4. BIONA Report* 12: 327–329, hg. v. W. Nachtigall und A. Wisser. Fischer, Stuttgart.
- Nachtigall W. (1977): „Zur Bedeutung der Reynoldszahl und der damit zusammenhängenden strömungsmechanischen Phänomene in der Schwimmphysiologie und Flugbiophysik.“ *Fortschritte der Zoologie: Bewegungsphysiologie Biomechanik* 24: 14–56.
- Neville A.C. (1975): *Biology of the Arthropod Cuticle*. New York: Springer.
- Newman B.G., Savage S.B., Shouella D. (1977): "Model Test on a Wing Section of a Dragonfly." In: *Scale Effect in Animal Locomotion*, hg. v. T.J. Pedley. Academic Press: London.
- Okamoto M., Yasuda K., Azuma A. (1996): "Aerodynamic Characteristics of the Wings and Body of a Dragonfly." *The Journal of Experimental Biology* 199: 281–294.
- Rees C.J.C. (1975): "Aerodynamic Properties of an Insect Wing Section and a Smooth Aerofoil Compared." *Nature* 258: 141–142.
- Rudall K.M. (1963): "Chitin/Protein Complexes of Insect Cuticles." *Advances in Insect Physiology*. 1: 257–313.
- Vincent J.F.V. (1980): "Insect Cuticle: a Paradigm for Natural Composites." *Symposia of the Society for Experimental Biology* 34: 183–210.
- Waterhouse D.F., Norris K.R. (1980): "Insects and Insect Physiology in the Scheme of Things." In: *Insect Biology in the Future*, hg. v. M. Locke und D.S. Smith. 19–37. New York: Academic Press.
- Wootton R. J. (1992): "Fuctional Morphology of Insect Wings." *Annual Review of Entomology* 37: 113–140.