

Wenn Flugzeuge die Flügel anpassen wie Vögel

Das Design eines Flügels ist ein Kompromiss zwischen allen Geschwindigkeiten und Fluglagen, die ein Flugzeug einnehmen kann. Die Form ist trotz Klappen und anderer Auftriebshilfen nie ideal, weder bei Start und Landung noch im Reiseflug. Forscher der Empa arbeiten deshalb an einem nachgiebigen Flügel, der sich kontinuierlich anpasst.



iStockphoto

Ein Beispiel von Geometrie-anpassung der Tragflächen in der Natur.

Die Natur war das Vorbild für die ersten Schritte in der Luftfahrt. Von Ikarus und Daedalus über Leonardo da Vinci bis zum «Schneider von Ulm» war klar: Der Vogelflug sollte nachgeahmt werden. 1889 veröffentlichte Otto Lilienthal, nur 14 Jahre bevor die Gebrüder Wright zum ersten erfolgreichen Motorflug abhoben, das Buch «Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst».

Es kam aber anders. Zwar sehen sich Flugzeuge und Vögel recht ähnlich, aber der bionische Gedanke musste grösstenteils aufgegeben werden. Das erste, von dem man sich verabschiedete, war die Idee des Schwingenflugs. Die Flügel von Vögeln und Insekten sorgen zugleich für Vortrieb und Auftrieb. Im Starrflügler sind hingegen die Funktionen klar getrennten Komponenten zugeordnet: Tragflügel

und Triebwerk. Bereits 1799 hatte George Cayley, britischer Ingenieur und Luftfahrtpionier, für diese Systemtrennung plädiert. Das zweite, weitgehend fehlende bionische Element ist die geometrische Anpassungsfähigkeit der Tragflächen. Ein wenig offensichtlicher Unterschied, aber nicht von geringerer Bedeutung. Tragflügel und Leitwerke moderner Flugzeuge werden als starre Strukturen gebaut, während ein Vogel die Flügelgeometrie kontinuierlich anpassen kann, je nach Flugbedingungen. Zwar besitzt ein Flugzeug Steuerflächen (Quer-, Seiten- und Höhenruder) und Hochauftriebshilfen (z. B. Landeklappen), aber diese sind sowohl hinsichtlich der Art als auch der Vielfalt der geometrischen Anpassungsfähigkeit mit den Möglichkeiten der Naturflieger nicht vergleichbar.

Der Knick im Flügel

Die Verstellung einer starren Ruderklappe verändert beispielsweise die Wölbung des Flügelprofils, was sich auf die Profildynamik auswirkt, d.h. den funktionalen Zusammenhang zwischen Auftrieb und Anstellwinkel. Das Profil allerdings, das dadurch entsteht, ist knickbehaftet und deshalb aerodynamisch ungünstig. Wesentlich besser wäre es, wenn das Profil entlang der gesamten Profiltiefe zu- oder entwölbt werden könnte.

Von konventionellen Steuerflächen wird «sparsam» Gebrauch gemacht: Sie werden grundsätzlich nur verwendet, um das Gleichgewicht des Flugzeugs zu kontrollieren, und nicht etwa, um die Geometrie des Profils dauerhaft an veränderte Flugbedingungen anzupassen. Die Anzahl der Freiheitsgrade der geometrischen Anpassungs-

fähigkeit wird minimal gehalten: Im Reiseflug sind es in der Regel nur drei, einer pro Rotationsachse.

Diese «Starrheit» hat seinen Preis. Könnte der für das Design zuständige Ingenieur in jeder Minute eines langen Fluges nach der Wahl der passenden Tragflächengeometrie erneut gefragt werden, so würde er jedes Mal mit einem neuen optimalen Entwurf antworten. Da dies eben nicht geht, muss er in das geometrisch festgelegte Design jede Menge Kompromisse einbauen. Das wirkt sich auf Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit des Flugzeugs aus.

Der Traum eines veränderlichen Flügels

Mit dieser Einschränkung im Vergleich zum biologischen Vorbild haben sich die Ingeni-

eure nie wirklich abgefunden. Zahlreiche Patente aus aller Welt, über das gesamte erste Jahrhundert der Luftfahrtgeschichte verteilt, verraten den Wunsch, sich in dieser Hinsicht der Natur anzunähern. Komplexe Mechanismen und segmentierte Tragflächen sollten den Traum des formveränderlichen Flügels verwirklichen. Grossforschungsprojekte wurden ins Leben gerufen, mit visionären Namen wie «adaptiver Flügel», «Smart Wing» oder «Morphing Aircraft». Ein Durchbruch scheint aber noch nicht in Sicht zu sein.

Die «Nuss», die es in der Frage der Formadaption zu knacken gilt, ist die Vereinbarung der Anforderungen. Der konventionelle Maschinenbau verbindet Verformbarkeit mit Belastbarkeit. Der typisch modulare Aufbau mit starren Gliedern und Gelenken wird diesen Anforderungen durch eine bewusste Trennung des Tragwerkes an diskreten Stellen gerecht. Dort, an gleitenden oder rollenden Schnittstellen von Lagern und Gelenken, wird die Bewegung uneingeschränkt ermöglicht, orthogonal dazu so weit wie möglich behindert. Der Leichtbau ist wiederum die Wissenschaft der hohen Belastungen und des geringen Gewichts. Er setzt auf Lastverteilung und vermeidet Unterbrechungen und Umleitung von Kraftflüssen. Das

tragende Material wird wirtschaftlich über dem Tragwerk verteilt, so dass es so nah wie möglich an seine Belastungsgrenzen kommt. Ein formveränderlicher Tragflügel braucht aber alle drei Eigenschaften: Belastbarkeit, Verformbarkeit und geringes Gewicht. Und das wird von keiner der etablierten Disziplinen angeboten: Leichtbausysteme sind grundsätzlich steif, Maschinenbausysteme tendenziell schwer. Weshalb es beim konventionellen Flugzeug gilt: So viel Leichtbau wie möglich, so wenig Maschinenbau wie nötig.

Nachgiebige Systeme

Eine neue Technologie könnte den Schlüssel liefern: Nachgiebige Mechanismen. Solche erfüllen die Funktion ohne Lager oder Gelenke und nutzen stattdessen die elastische Verformbarkeit des Materials. Sie sind monolithisch aufgebaut, ohne Diskontinuitäten in der Materialverteilung und sind deshalb wesentlich besser geeignet für den Leichtbau. Darüber hinaus sind sie spiel- und abriebfrei und benötigen keine Wartung. Das berühmteste Beispiel ist die Pinzette, die im Vergleich zu einer Zange oder einem Nussknacker stoffschlüssig aufgebaut ist. Eine junge Arbeitsgruppe an der Empa arbeitet seit 2006 daran, dieses Prinzip auch dort anzuwenden, wo bisher, aufgrund

grosser Lasten, hauptsächlich konventionelle Lösungen Anwendung finden. In den letzten Jahren hat die Gruppe in Zusammenarbeit mit der Industrie zahlreiche Lösungen hauptsächlich in den Bereichen Medizintechnik und Robotik erarbeitet. Aus dieser Tätigkeit ist Ende Oktober die Firma Monolitix AG entstanden.

Leicht muss es sein

Die Inspiration der Empa-Forscher bleibt die Vision der formveränderlichen Leichtbautragflächen. Ein Designkonzept existiert, angelehnt an die bewährte Leichtbauweise konventioneller Tragflügel: Ebene nachgiebige Systeme sollen die konventionellen Rippen ersetzen, die in der klassischen Bauweise als starren Platten ausgeführt sind und für eine unveränderliche Profilgeometrie sorgen. Das Design dieser «Gürtelrippen» entsteht als das Ergebnis einer komplexen Optimierung, die dafür sorgt, dass die Rippen einerseits genug Flexibilität besitzen, um dem Flügel eine sanfte Profilanpassung zu ermöglichen, andererseits – aufgrund der optimalen Steifigkeitsverteilung – keine unerwünschten Veränderungen des Tragflügelquerschnittes zulassen, etwa durch unerwartete Aussenlasten. Der Tragflügel der Zukunft könnte also eine monolithische Struktur besitzen,

ohne konventionelle Ruder und Klappen, und mittels kontrollierter Dehnung und Verzerung im Material die oben angesprochene Einschränkung des starren Designs aufheben. Der Designer könnte sozusagen mitfliegen und das Flügelprofil kontinuierlich überdenken. Ziel wäre beispielsweise die Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen oder eine verminderte Lärmbelastung durch eine erhöhte Flexibilität in der Gestaltung der Anflugprozeduren.

Energie aus der Luftströmung

Ein denkbarer Nachteil eines solchen monolithischen, formveränderlichen Tragflügels besteht in der mechanischen Energie, die zur aktiven Verformung des Tragflügels bereitgestellt werden muss. Hierfür haben sich die Wissenschaftler an der Empa eine innovative Lösung ausgedacht: Die der aeroelastisch aktiven Tragflächen. Sie entnehmen die Energie für die Verformung aus der Luftströmung. So bleiben die Aktuatorssysteme klein und leicht, bei voller Kontrolle der Tragflächengeometrie. Schlüsseldisziplin für diese Idee ist die Aeroelastik, die Wissenschaft der Kopplung zwischen elastischen Verformungen an umströmten Tragflächen und den Luftkräften, die auf die Tragflächen wirken. Dank der nachgiebigen Systeme ist nun möglich, Tragflächen bewusst in der Nähe aeroelastischer Instabilitäten zu betreiben, die vorher streng zu vermeiden waren, und diese bewusst zu nutzen. Ein mutiger Gedanke? Nicht mehr und nicht weniger als Velofahren. Wer lieber Velo als Dreirad fährt, zieht ein inhärent instabiles Vehikel vor. Man investiert im Kindesalter in eine prellungsreiche Lernzeit, um nachher ein wendigeres und leichteres Fahrzeug zu fahren. 

Dr. Flavio Campanile
Gruppenleiter der Abteilung
Mechanics for Modelling and
Simulation, Empa
www.empa.ch



Konzept eines monolithischen Flügels nach dem Gürtelrippenprinzip.