

ANWENDUNGSPOTENTIAL EINER NACH DEM VORBILD DER NATUR STRUKTUROPTIMIERTEN BAUWEISE IN DER LUFTFAHRT

M. I. Zuardy, FIBRE, Airbus-Strasse 1, 21684 Stade, Deutschland
C. Fastert, CTC GmbH, Airbus-Strasse 1, 21684 Stade, Deutschland
H. Purol, Xperion Aerospace GmbH, Claude Dornier Straße, 88039 Friedrichshafen, DE
R. Gomeshi, M. Milwich, ITV, Körschtalstraße 26, 73770 Denkendorf, Deutschland
A. S. Herrmann, Airbus Operations GmbH, Kreetslag 10, 21129 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Die Entwicklung von Fluggeräten hat in vielen Facetten das Flugverhalten der tierischen Naturvorbilder nachgeahmt. Wie bei Vögeln bestimmt vor allem die gewölbte Form der Flügel die aerodynamischen Eigenschaften. Die Aufspreizung der Flügelenden von großen Vögeln inspirierte die Entwicklung des *Winglets* an der Spitze von Flugzeugflügeln, welches die entstehende Wirbelschleppe und den hieraus induzierten Widerstand bzw. den Kraftstoffverbrauch reduzieren kann. Diese Art der Umsetzung von biologischen Erkenntnissen in technische Anwendungen wird Bionik genannt. Eine zukünftige bionische Flügelentwicklung wird es im Bereich der adaptiven Formanpassung für verschiedene Flugzustände geben.

Diese Arbeit diskutiert das Anwendungspotential eines pflanzlichen Naturvorbilds, des Pflanzenhalms, in der Luftfahrtstruktur. Diese pflanzliche Faserverbundbauweise wird mit geringem Material- und Energieaufwand aufgebaut, erzielt jedoch erstaunliche mechanische Leistungen. Beispielsweise ist der Winterschachtelhalm aus äußerem und innerem Druckzylinder und verbindenden, abstandshaltenden Stegen aufgebaut. Betrachtet man die beiden Druckzylinder als Deckhäute und die Stege als einen kontinuierlichen Kern, dann erkennt man eine Kernverbund- bzw. Sandwichbauweise. Die runde Sandwichbauweise mit einer hohen spezifischen Wandsteifigkeit verhindert Quetschen und Knicken der Halmstruktur. Durch die weiterentwickelte Flechtpultrusionstechnik ist die spezielle Profilstruktur, der sogenannte technische Pflanzenhalm, großserienfähig und damit kostengünstig herzustellen. Die dynamischen 3-Punkt-Biegeversuche zeigen, dass die technischen Pflanzenhalme höhere Dämpfungsfaktoren aufweisen als Vollrohre mit der gleichen Fasermenge im Querschnitt. Außerdem weist die Halmstruktur ein gutmütiges, zähes Bruchverhalten auf. Die genannten Struktureigenschaften lassen sich zur Auslegung von Verbindungsstreben nutzen. Weiterhin wird eine Variante des Pflanzenhalmprofils mit unterschiedlichen Fasern, das sogenannte Gradientenprofil, diskutiert. Eine geeignete Lasteinleitungs- bzw. Anschlussstruktur ermöglicht die Auslegung einer Verbindungsstrebe nach der Schadenstoleranzphilosophie, die für Primärstrukturen in der Luftfahrt wesentlich ist.

1. EINLEITUNG

Seit dem 1505 erschienenen „Kodex über den Vogelflug“ von *Leonardo Da Vinci* führte „Der Traum vom Fliegen“ die Menschen Jahrhunderte lang dazu, die Aerodynamik des Vogelfluges zu analysieren. Vögel erzeugen den notwendigen Vor- und Auftrieb beim Flug mit ihrem Körper und dieser nimmt Einfluss auf sein Auftriebsverhalten. Weiterhin generieren sie durch die Schlag- bzw. Abwärtsbewegung ihrer Flügel den nötigen Auftrieb beim Abheben, ähnlich einem senkrechtstartenden Flugzeug, das zum Abheben einen Zusatz- oder Schwenkantrieb benötigt. Der deutsche Luftfahrtpionier *Otto Lilienthal* experimentierte im Jahre 1867 und 1868 mit Schlagflügeln und kam damals nicht über eine maximal hebbare Masse von 40 kg hinaus (BILD 1). Dies ist vergleichbar mit der Beobachtung bei Vögeln mit mehr als 15 kg Gewicht, welche Schwierigkeiten beim Abheben haben. Ähnlich wie bei Flugzeugen in einem stationären Segel- bzw. Reiseflug beeinflusst beim Vogelflug die gewölbte Form der Flügel den erforderlichen Auftrieb. Die im vorderen Bereich abgerundete und nach hinten immer schmaler zulaufende Tragfläche eines Flugzeuges ist dem Flügel eines Vogels sehr ähnlich. Die Erkenntnis, dass gewölbte Tragflächen einen größeren Auftrieb liefern als ebene, nannten die *Brüder Lilienthal* die

wichtigste flugtechnische Entdeckung seiner Zeit. Nach der Erfindung des steuerbaren Flugzeuges im Jahre 1903 durch die *Brüder Wright* lassen sich Luftfahrtingenieure von faszinierenden Fähigkeiten der fliegenden Kreaturen immer mehr inspirieren. Derartige Entschlüsselung und innovative Umsetzung von Prinzipien aus der Natur in die Technik, die häufig über mehrere Modifikationsschritte abläuft, ist die Grundidee der Bionik bzw. Biomimetik [1].

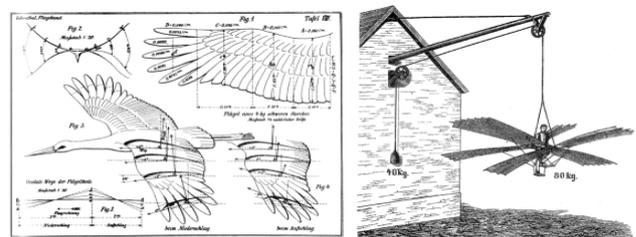


BILD 1. Vogelbionik in Lilienthals Buch (l) und seine berühmten Flügelschlag-Experimente (r) [2]

In der modernen Luftfahrt, wo das Fliegen in der Nähe der Schallmauer genauso sicher und bequem wie das Autofahren ist, spielen nicht nur Vogelbionik, sondern auch andere Naturvorbilder wie Fisch- und Pflanzenbionik zur Effizienzsteigerung des Flugbetriebs eine wichtige Rolle.

1.1. Bionik des Vogelfluges (Flugphysik)

Luftfahrtingenieure nehmen sich den Vogelflug zum Vorbild, um das Flugverhalten des Flugzeuges zu optimieren.

1.1.1. Aerodynamik (Strömung)

Aufgrund des unterschiedlichen Druckverhältnisses an der Ober- und Unterseite eines Flügels zur Erzeugung des erforderlichen Auftriebs entsteht ein sog. Randwirbel durch den Druckausgleich im Bereich der Flügelspitze, der wiederum einen Luftwiderstand (*drag*) induziert [3]. Um diesen Effekt zu verringern, spreizen die Vögel ihre Handschwingen beim Flug auf. Diese wandeln den ursprünglich großen Wirbel in viele kleine um, die sich teilweise entgegenwirken, so dass der gesamte induzierte Widerstand minimiert wird. Nach einem ähnlichen Prinzip wird die Flügelspitze eines Flugzeuges mit Flügelerweiterungen, *Winglets*, versehen (BILD 2). Diese reduzieren die Wirbelschleppe und den hieraus induzierten Widerstand. Dadurch wird Kraftstoff eingespart und die Flugzeuge können zusätzlich in geringeren Zeitabständen starten und landen.

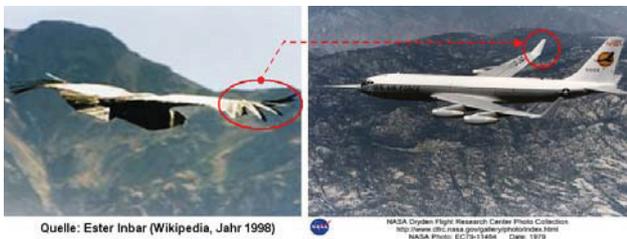


BILD 2. Handschwingen eines Kondors und Winglets bei einem KC-135A Flugzeug der NASA [4]

1.1.2. Aeroelastik (Strömung-Struktur)

Bei einem zu steilen Flug können die von dem Auftrieb abhängigen, in Flügeltiefenrichtung entstehenden Anfahrwirbel abreißen und zu einem Strömungsabriss (*stall*) führen [3]. Daher richten Vögel beim Fliegen ihr Deckgefieder ständig auf, um sich den jeweiligen aerodynamischen Anforderungen, wie bei schnellen Flugmanövern oder einem langsamen Gleitflug, anzupassen. Dementsprechend werden Flugzeuge mit einem aus mehreren Klappen bestehenden Hochauftriebssystem ausgerüstet. Die ausfahrbaren Klappen an Vorder- und Hinterseite der Tragflächen erlauben zwar Korrekturen des Flugzustands, erhöhen aber gleichzeitig den Luftwiderstand. Optimal wäre ein adaptiver Flügel (*variable wing*), der die Form wie bei einem Vogel an verschiedene Flugzustände anpassen kann. Diese zukünftigen bionischen Entwicklungen der Flugzeugflügel setzen nicht nur Kenntnisse der Aerodynamik voraus, sondern auch bezüglich der Struktur und der Systeme, beispielweise durch den Einsatz intelligenter Materialien. Ein entwickeltes Flügelmodell kann bereits seine Hinterkante stufenlos auf- und abwölben (BILD 3).

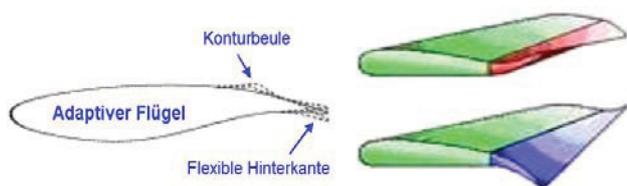


BILD 3. Adaptiver bzw. bionischer Flugzeugflügel [5]

1.2. Bionik des Pflanzenwachstums (Struktur)

Für einen ökonomischen wie ökologischen Flugbetrieb eines Flugzeuges sollten nicht nur seine Flugeigenschaften effizient sein, sondern auch sein Strukturgewicht optimiert sein. Aus strukturmechanischer Sicht bieten weitere Naturvorbilder wie Pflanzen perfekt angepasste Funktionsprinzipien, weil sie hauptsächlich unter ruhender Last stehen. Ihre Struktur ist daher nach statischen Optimalitätskriterien aufgebaut. Faserverbundkunststoffe (FVK) sind ein erfolgreiches Beispiel für die Umsetzung von Pflanzenstrukturen, deren gewichts- bzw. festigkeitsoptimierte Hölzer aus in Harz eingebetteten Fasern bestehen.

1.2.1. Äußere Strukturoptimierung (Form)

Kerbwirkung lässt sich beispielweise bei einer Gabelstruktur minimieren, wenn ihre Gestalt diejenige einer Astgabel eines Baums annimmt (BILD 4). Bäume streben von Natur aus nach einer gleichmäßigen mechanischen Spannungsverteilung über ihre gesamte Oberfläche (*fully stressed design*), um die Überhöhung der Spannung bei schweren Wind- oder Schneelasten zu reduzieren. Weiterhin steuern sie gegen die möglichen lokalen Überbeanspruchungen mit einem „lastangepassten“ Wachstum bzw. optimaler Materialausnutzung. Sie legen an den entsprechenden Stellen Material zu, beispielweise durch Bildung von Wülsten oder Wurzelanläufen. Diese statischen Optimalitätskriterien sind genauso in den Leichtbau zu übertragen, wenn man die Topologie der Struktur dem „Baumalgorithmus“ entsprechend konstruiert (*topological optimization*).

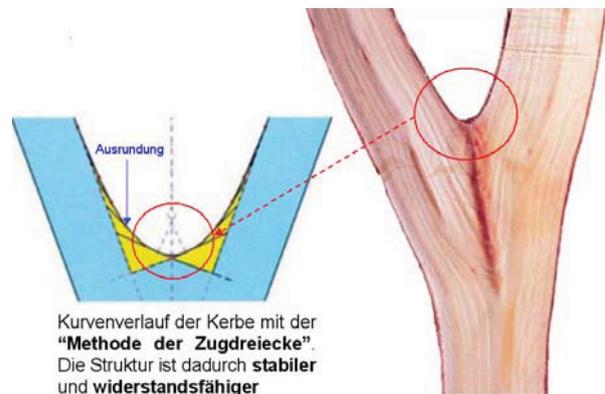


BILD 4. Astgabelform eines Nussbaums zur Minimierung der Kerbwirkung [6]

1.2.2. Innere Strukturoptimierung (Gestalt)

Ergänzend zu dem vorherigen Optimierungsprinzip der äußeren Form von biologischen lasttragenden Strukturen bzw. Bäumen stellt ihre innere optimale Struktur mit der schubspannungsfreien Gestaltung ihrer Längsfasern ein anderes Optimierungsprinzip dar (Gestaltoptimierung). Ein weiteres pflanzliches Vorbild, der Pflanzenhalm, kommt in der Natur mit optimaler Struktureigenschaft unter verschiedenen Gesichtspunkten vor (*multicriteria design optimization*). Diese untereinander abgestimmten Struktureigenschaften umfassen u.a. hervorragende spezifische Biegefestigkeit und Knicksteifigkeit, hohe Vibrationsdämpfung, gutes Impactverhalten und gutmütiges Bruchverhalten [7]. Drei von den fünf im Pflanzenhalm identifizierten biologischen Konzeptgeneratoren sind in dem folgenden BILD 5 anhand deren biologischen Vertretern erläutert.

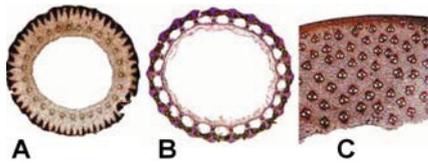


BILD 5. Drei biologische Konzeptgeneratoren für die biomimetische Übertragung [7]

Der Halmquerschnitt zeigt ein verzahntes Gewebe von *Equisetum giganteum* (BILD 5, A), eine Sandwichkonstruktion von *Equisetum hyemale* (BILD 5, B) sowie morphologische Bauweise mit strukturellem Übergang von *Arundo donax* (BILD 5, C). Diese morphologischen Strukturen beeinflussen wesentlich die mechanischen Eigenschaften dieser Pflanzenhalme. Die Untersuchung durch die Universität Freiburg ergab eine interessante mechanische Charakteristik der biologischen Konzeptgeneratoren [8].

Im Rahmen der BMBF-Forschung wird von dem Winterschachtelhalm (BILD 5, B) ein neuartiges FVK-Profil, der sogenannte „technische Pflanzenhalm“, abgeleitet und seine Einsatzmöglichkeit als Verbindungsstrukturen in der Luftfahrt untersucht [9]. Die in dem technischen Pflanzenhalm über das abstrahierte, bionische Prinzip eingeflossenen Faserverbundaspekte der Strukturoptimierung sind: ein Steifigkeitsübergang innerhalb des Halms, optimale Faserorientierung, graduelle Verbindung zwischen Fasern und Matrix, verzahntes Gewebe und spiralförmige Wandverstärkung, wie im BILD 6 schematisch dargestellt wird.

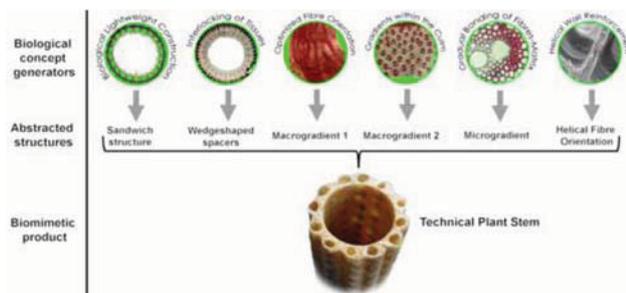


BILD 6. Entwicklung biomimetischer Struktur durch die Implementierung eines abstrahierten Prinzips der bionischen Konzeptgeneratoren [7]

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in innovative, recyclebare Faserverbundprofile mittels des Flechtpultrusionsverfahrens umgesetzt [10]. Weiterhin kann das „Rippen“-Prinzip eines Bambusrohrs (BILD 7) für die Versteifung einer langen Profilstruktur bzw. zur Lasteinleitung in Querrichtung des Profils implementiert werden.

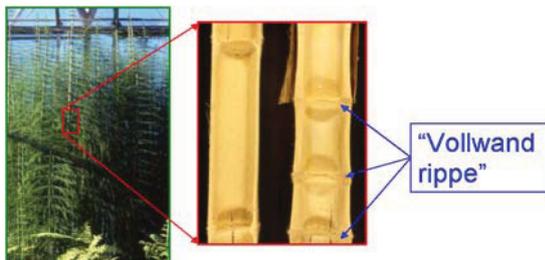


BILD 7. Prinzip der Verrippung eines Bambusrohrs zur Lasteinleitung aus den Blättern [16]

Die Pflanzenwelt liefert somit eine wertvolle Hilfestellung (Algorithmus) zur Optimierung der Leichtbaustrukturen.

2. CHARAKTERISIERUNG DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN

Die Strukturanalyse hat auf Grund statischer Druck- und Biegebelastung unter Anwendung der analytischen Knick- und Biegegleichungen und dem FE-Programm NASTRAN den technischen Pflanzenhalm mit klassischen Rundprofilgeometrien aus GFK-Material verglichen. Der Vergleich ergibt eine höhere spezifische Knick- und Biegesteifigkeit für den technischen Pflanzenhalm TAB 1.

Größe	Einheit				
Masse / Länge	[kg/m]	0,66	0,42	0,30	0,39
Spezifische Biegesteifigkeit (E'I)	[Nm ² /kg]	535.431	732.429	742.500	1.568.821
Spezifische Durchbiegung (f')	[mm/kg]	89,5	162,4	313,3	125,4
Spezifische Dehnung (ε')	[%/kg]	1,1	1,9	3,7	1,5
Spezifische Knickdrucklast (F')	[N/kg]	1320	1805	1830	2715

TAB 1. Eigenschaftsvergleich verschiedener Rohrprofile mit dem Grundprofil des tech. Pflanzenhalms und Gradientenprofils (GFK-CFK) (rechts)

Vergleicht man zusätzlich den technischen Pflanzenhalm und Rohrprofile bei gleicher Strukturmasse, dann wird ersichtlich, dass die Wandsteifigkeit bei dem technischen Pflanzenhalm auf Grund der Entlastungskanäle höher liegt. Die Profilwand des technischen Pflanzenhalms wirkt in Umfangsrichtung wie eine Sandwichbauweise (BILD 8) und erhöht damit die Quetschsicherheit der Profilwand gegen die sog. Brazierlast in Folge einer Biegebelastung. Außerdem weist die Pflanzenhalmstruktur ein gutmütiges, zähes Bruchverhalten auf, welches in starkem Gegensatz zu dem spröden Bruchverhalten gängiger Rohrprofilstrukturen aus Faserverbundkunststoffen steht.

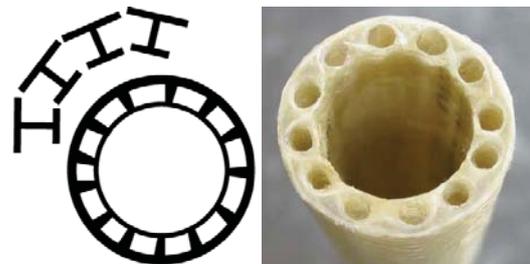


BILD 8. Sandwichprinzip in Umfangsrichtung (links) bei einem technischen Pflanzenhalm (rechts) [10]

Eine weitere Option wäre ein optimierter technischer Pflanzenhalm aus GFK, dessen Seitenkanäle ideal spaltfrei mit CFK-Faserstränge mit UD-Faserorientierung gefüllt sind (TAB 1). Dieser technische Pflanzenhalm weist aufgrund des CFK-Einsatzes die größten spezifischen mechanischen Kennwerte, insbesondere in der Biegesteifigkeit und der Knickdrucklast, auf und ist daher für einen Einsatz als hauptlasttragende Struktur geeignet. Je nach Größe der Lasten in den verschiedenen Raumrichtungen, könnten auch nur einige Kanäle mit CFK-Stäbchen gefüllt sein. Der weitere Vorteil dieser Bauweise ist, dass die von GFK umgebenden bzw. geschützten hauptlasttragenden CFK-Faserstränge die Lasten einzeln tragen (mehrfache Lastpfade), was ihre Schadenstoleranz erhöht.

3. FERTIGUNG

Für die Fertigung von Faserverbund-Hohlstrukturen werden typischerweise die Wickeltechnik (*filament winding*) und das Schlauchblasverfahren eingesetzt (BILD 9). Diese beiden Verfahren eignen sich wirtschaftlich nur zur Fertigung von geringen Stückzahlen. Für den Einsatz in der kommerziellen Luftfahrt mit den hohen Stückzahlen von Bauteilen bzw. der hohen Kadenz bei den Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen, soll eine kontinuierliche und damit auch kostengünstige Fertigung, beispielweise das Pultrusionsverfahren, angewendet werden [11].

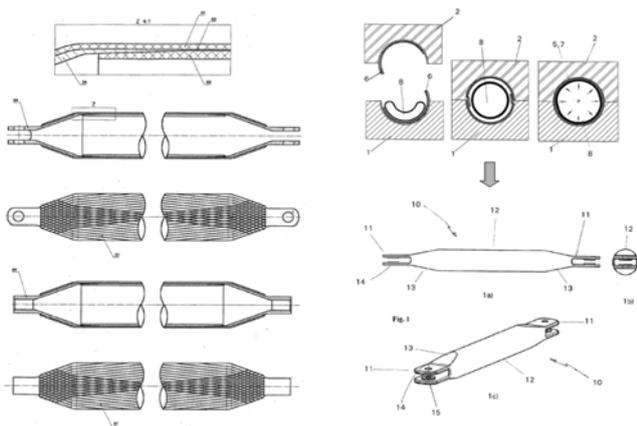


BILD 9. Fertigung einer CFK-Hohlstruktur für eine Verbindungsstrebe mittels Wickeltechnik (links) und Schlauchblasverfahren (rechts) [12, 13]

3.1. Flechtpultrusion (Pull braiding)

Zur Fertigung von Profilen der technischen Pflanzenhalme ist die Pultrusion mit anderen Textilverfahren zu kombinieren, z. B. Flechtpultrusion. Mittels der in die Pultrusionslinie integrierten Flechtmaschine können wendelförmig verlaufende Fasern im Bauteil erzeugt werden, dadurch lassen sich Kanäle in der Profilwand des technischen Pflanzenhalms gut realisieren. Im besonderen hat die Flechttechnik den Vorteil, dass die Faserwinkel leicht an die bestehenden Belastungen des Bauteils angepasst werden können. Es ist sogar möglich, zur Herstellung von graduellen Strukturen die Faserwinkel während des laufenden Flechtpultrusionsprozesses zu verändern.

Die am ITV aufgebaute Flechtpultrusionstechnik ist ein besonders geeignetes Verfahren, die Anforderungen bezüglich technischer Umsetzung der Pflanzenhalmvorbilder und einer wirtschaftlich interessanten Herstellung zu vereinen (BILD 10). Der Vorteil der großserientauglichen Pultrusionstechnik ist, dass Faserverbundbauteile von der Faser bis zum fertigen Profil auf nur einer Anlage kostengünstig hergestellt werden können, wobei Duroplast- und Thermoplastmatrix gleichermaßen verarbeitbar sind. In der Duroplasttechnik werden die auf einem Spulengatter gelagerten Rovings durch ein Matrix-Imprägnierungsbad und anschließend durch ein beheiztes Pultrusionswerkzeug geführt, wobei die Matrix der imprägnierten Fasern beim Durchlaufen durch das Werkzeug aushärtet und somit das fertige Profil das Werkzeug verlässt [14]. Das Flechtpultrusionsverfahren wird am ITV im Rahmen der BMBF-Forschung mit einer Dissertation hinsichtlich Funktionalität, Anlagekapazität, Serienfähigkeit und erzielbare mechanische Eigenschaften der Profile weiterentwickelt.

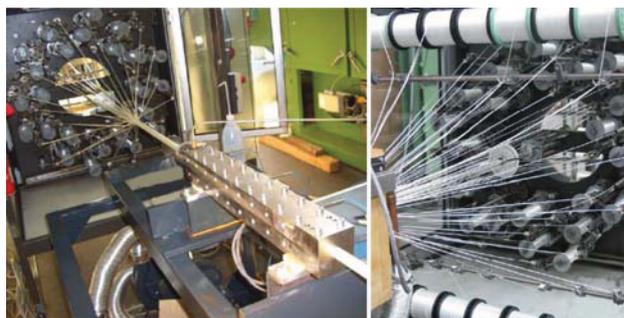


BILD 10. Flechtpultrusionsanlage des ITV-Denkendorf

3.2. Herstellung von Hybridrovings

Am ITV wurde eine Anlage für eine gleichzeitige Extruder-Beschichtung von 16 Rovings konzipiert und aufgebaut. Für den Extruder und den Spinnkopf wurden ein Gestell und ein Adapter gefertigt, damit der Extruder mit dem Spinnkopf gekoppelt werden kann und die beschichteten Fasern nach unten abgezogen werden können. Zur Verbesserung der Roving-Beschichtung wurde eine zusätzliche Beschichtungs- bzw. Kalibrierdüsenplatte gefertigt, welche ebenfalls beheizt wurde (BILD 11).



BILD 11. Weiterentwicklung der Flechtpultrusion: Beschichtung von 16 Einzelfäden (links) und Zusatzschlitzscheibe (rechts) [15]

3.3. Einbringung der UD-Faserstränge

Die Aufwertung zum Gradientenprofil bedarf einer besonderen Betrachtung der Fertigungstechnologie. Für ein hochbelastbares Gradientenprofil musste ein Weg gefunden werden, wie die unidirektionalen Verstärkungsfasern möglichst spaltfrei mit in die Profilhohlräume zu integrieren. In dieser Arbeit wurden die Prototypen noch im Labormaßstab manuell gefertigt (BILD 12).

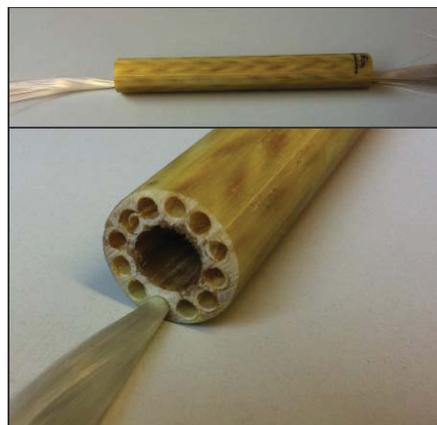


BILD 12. Manuelle Einbringung der UD-Faserstränge

Eine mögliche Lösung für kontinuierliche Einbringung der UD-Faserstränge kann wie folgt konzipiert werden:

Der Flechtmaschine, welche das eigentliche Pflanzenhalmprofil herstellt, wird eine Pultrusionsanlage vorgeschaltet, die einfache Rundprofile mit unidirektionalen Fasern und thermoplastischer Matrix für die Nebenkerne produziert. Der Durchmesser dieser Stäbe entspricht genau den im Pflanzenhalmprofil vorgesehenen, in der Halmwandung liegenden Hohlräumen. Diese Rundprofile durchlaufen direkt im Anschluss die Flechtmaschine und werden umflochten. Bereits an dieser Position wird das Profil eine hohe Eigenstabilität aufweisen und kann durch das zweite Pultrusionswerkzeug gezogen werden, in dem das noch fehlende Matrixmaterial eingespritzt und das Profil ausgehärtet bzw. bei thermoplastischer Matrix konsolidiert wird.

3.4. Anschlusskonzepte

Neben der eigentlichen Strukturauslegung, die den erforderlichen Querschnitt des Pflanzenhalms für eine Verbindungsstrebe ermittelt, müssen die Lasten in den Pflanzenhalm eingeleitet werden, so dass hierfür Lasteinleitungsprinzipien zu entwickeln sind. Weiterhin muss die Lasteinleitung bei einem Störfall im Betrieb (*jamm case*) die Biegelast gut aufnehmen können, um die hervorgerufenen Durchbiegung möglichst klein zu halten. Diese stellt die Exzentrizität dar, die die Knickgefahr entsprechend erhöht. Beispiele hierfür sind im BILD 13 schematisch dargestellt.

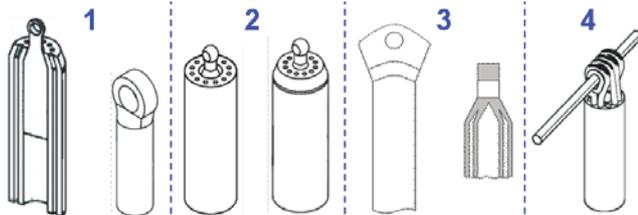


BILD 13. Einige Prinzipien der Lasteinleitungen (Anschlüsse) für den technischen Pflanzenhalm

Das erste Prinzip geht von einem augenförmigen Kraftanschluss aus, der einen zylindrischen Zapfen aufweist – mit einem Außendurchmesser, der dem Innendurchmesser des Pflanzenhalms entspricht und mit dem Pflanzenhalm verklebt wird oder über eine Presspassung durch Erwärmen des Pflanzenhalms, Abkühlen des Zapfens und anschließendem Fügen sowie Verpressen der beiden Teile gefügt wird.

Im zweiten dargestellten Prinzip ist der Zapfen des Kräfteinleitungselements konisch geformt – mit dem durch eine trichterförmige Heizfläche lokal aufgeschmolzen maximalen Durchmesser, der dem Innendurchmesser des Pflanzenhalms entspricht. Nach dem Einführen des Zapfens wird der Pflanzenhalm über den Konus gepresst, so dass eine formschlüssige Verbindung entsteht.

Im dritten Prinzip wird der Pflanzenhalm lokal auf Schmelztemperatur aufgeheizt und an den Enden verpresst, so dass ebene Fügeflächen entstehen, die einfach durchbohrt und mit einer Buchse zu versehen sind.

Im vierten Prinzip werden durch einige Außenkanäle trockene Kohlenstofffasern gezogen, die an den Enden eine Kräfteinleitung umschlaufen können.

In der folgenden TAB 2 werden die vorgestellten Kräfteinleitungsprinzipien in einer Bewertungsmatrix verglichen.

Bewertungsschema: 0: völlig ungeeignet 1: bedingt geeignet 2: geeignet 3: sehr gut geeignet	Materialgerechte Konstruktion	Herstellungsaufwand	Integrierbarkeit in die kontinuierliche Fertigung	Haltbarkeit	Eigenmasse	Anwendbarkeit auf unterschiedliche Konfigurationen	Toleranzausgleich	Summe	
									Wichtungsfaktor
		1	2	1	1	2	3	2	
Ergebnis inkl. Wichtungen									
		3	6	2	3	6	3	4	27
		1	1	1	2	2	3	2	
Ergebnis inkl. Wichtungen									
		3	3	2	6	6	3	4	27
		3	3	3	2	3	3	2	
Ergebnis inkl. Wichtungen									
		9	9	6	6	9	3	4	46
		3	1	0	2	2	1	1	
Ergebnis inkl. Wichtungen									
		9	3	0	6	6	1	2	27

TAB 2. Matrix zur Bewertung der verschiedenen Kräfteinleitungs- bzw. Anschlusskonzepte

Die Bewertungskriterien sind im folgenden kurz erläutert:

- Materialgerechte Konstruktion:** Inwiefern eignet sich das Prinzip dazu, die werkstoffspezifischen Eigenschaften auszunutzen?
- Herstellungsaufwand:** Wie groß ist der Aufwand, um das vorgeschlagene Prinzip an einem bestehenden Pflanzenhalm umzusetzen?
- Integrierbarkeit in die kontinuierliche Fertigung:** Lässt sich das Herstellungsverfahren der Kräfteinleitungselemente in eine kontinuierliche Fertigung, z.B. Pultrusion integrieren?
- Haltbarkeit:** Wie dauerhaft wird die Verbindung bei wechselnden Beanspruchungen sein?
- Eigenmasse:** Inwieweit erhöht sich durch die Lasteinleitung die Eigenmasse?
- Anwendbarkeit auf unterschiedliche Konfigurationen:** Wie gut lässt sich das Konzept auf die unterschiedlichen Ausprägungen (Kohlefaserverstärkte Hohlkammern, etc.) anwenden?
- Toleranzausgleich:** Ist es möglich, vorgegebene Toleranzen, z.B. Bohrungsabstand einzuhalten?

Unter den angegebenen Bewertungskriterien zeigt sich, dass das dritte angeführte Prinzip das größte Potential aufweist. Die wesentlichen Vorteile dieser Lösung sind im Folgenden kurz aufgeführt:

- **Kein Einsatz von weiteren Hilfsmaterialien**, wie etwa metallischen Beschlägen nötig
- Dadurch **keine Erhöhung der Eigenmasse**
- **Einfacher Herstellprozess:** Nach der Pultrusion Profil ablängen, Enden erwärmen und zusammenpressen, Überstehende Materialreste entfernen, Aufnahme-Bohrungen einbringen

4. ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Um den technischen Pflanzenhalm für verschiedene Anwendungsszenarien optimal einzusetzen, bedarf es einer auf den Lastfall adaptierten Bauweise. Zusammengefasst werden die optimalen Anwendungsmöglichkeiten im folgenden Diagramm (BILD 14) dargestellt.

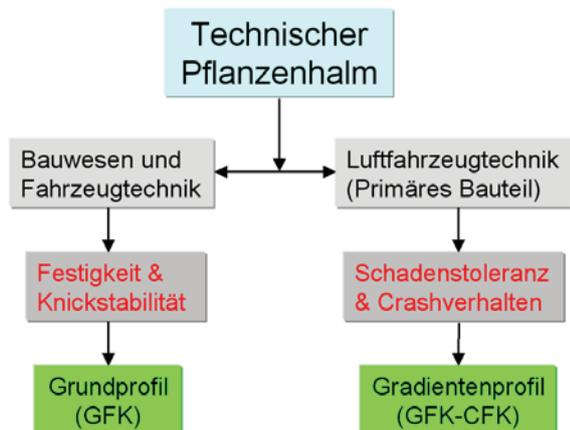


BILD 14. Anwendungsmöglichkeiten der unterschiedlichen technischen Pflanzenhalme

4.1. Anwendung im allgemeinen Bauwesen

Für allgemeine Bauweisen, beispielsweise in der Gebäudetechnik, dem Brückenbau und der Fahrzeugtechnik eignet sich auf Grund seiner hervorragenden Quetsch- und Knickstabilität vor allem das ursprüngliche technische Pflanzenhalmprofil. Das mit der entwickelten Flechtpultrusion kostengünstig herzustellende Grundprofil des Pflanzenhalms rechtfertigt seinen Einsatz im Bauwesen, wo die Struktur mehr von der Festigkeit getrieben wird als von der Schadenssicherheit und Gewichteinsparung.

4.2. Anwendung in der Luftfahrzeugtechnik

Für die Anwendung in der Luftfahrt, besonders in den hauptlasttragenden Bauteilen, sind neben der spezifischen Steifigkeit auch die Impactschadenstoleranz und gegebenenfalls das Crashverhalten von großer Bedeutung. Impactgefährdete Bauteile müssen nach dem Eintreten von Schäden bis zu einem bestimmten Inspektionsintervall die Bemessungsbruchlasten sicher ertragen. Dabei basiert die Schadenstoleranz auf der in der Luftfahrt bekannten Konstruktionsphilosophie „Fail safe“, d.h. es wird im Bauteil mehr als ein Lastpfad vorgesehen, damit beim Versagen eines Lastpfades die Lasten auf die verbliebenen übertragen werden. Das Gradientenprofil aus der TAB 1 mit einem GFK Grundkörper und der hauptlasttragenden CFK-Füllung der Seitenkanäle bietet aufgrund seiner Mehrlastpfade eine verbesserte Schadenstoleranz. Weiterhin schützt der weniger tragende GFK-Grundkörper die CFK-Stäbe bei einer seitlichen Beschädigung des Profils. Nicht zuletzt ist die ermüdungsfreie Faserverbundbauweise für die wechselbelasteten Luftfahrtbauteile sehr geeignet.

4.3. Untersuchung zur Luftfahrtanwendung

Zur Anwendung des technischen Pflanzenhalms in der primären Struktur der Luftfahrzeugtechnik wird im Hinblick auf die Schadenstoleranzanforderung das Gradientenprofil

bevorzugt. Das Profil besteht aus den hauptlasttragenden CFK-Stäben und dem umgebenden, schützenden GFK-Profil. Die in Frage kommenden balkenförmigen primären Bauteile bzw. Verbindungsstrebe werden diskutiert.

4.3.1. Verbindungsstrebe (Außenanwendung)

Eine mögliche Anwendung wäre der sog. „Rear Link“, die hintere Stützstange für die Landeklappenbefestigung am Flügel eines großen Passagierflugzeuges (BILD 15). Der Rear Link ist in Aluminium-Bauweise als Doppel-T-Profil mit Krafteinleitungen im Steg des Querschnitts in einer „Fail Safe“-Konstruktion ausgelegt. Hierbei handelt es sich um ein aus dem Vollen gefrästes Alu-Bauteil mit einem zweiten Lastpfad aus Titan entlang der Bauteilsehne, so dass durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen mit einer bionisch optimierten Konstruktion wie der technische Pflanzenhalm ein großes Leichtbaupotenzial besteht.

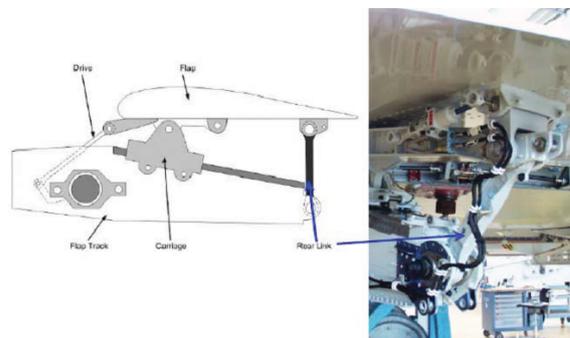


BILD 15. Verbindungsstrebe Landeklappen/Träger (Rear Link) in Metallbauweise [9]

An den Rear Link werden hohe Lastanforderungen von statischen und dynamischen bzw. Ermüdungslasten gestellt. Im Rahmen der Arbeiten wird am CTC Stade zu nächst das optimale Grundprofil aus CFK auf seine Anwendbarkeit als Rear Link untersucht, denn es hat bereits ein gutes Impactverhalten bzw. Kerbschlagzähigkeit, wie der Charpy-Schlagversuch (BILD 16) beispielhaft zeigt. Später soll dann mit dem Gradientenprofil aus GFK-CFK Fasern gearbeitet werden, das höhere Schadenstoleranzfähigkeit durch mehrfache Lastpfade der einzelnen Faserstränge für solche hauptlasttragende Bauteile ermöglicht.

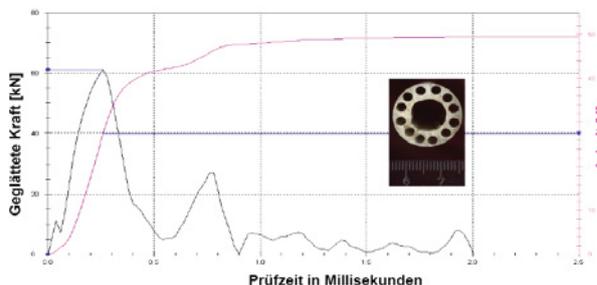


BILD 16. Der technische Pflanzenhalm widersteht dem Schlag eines 50 [J] Pendels. Die Kerbschlagzähigkeit ist dabei größer als 321 [kJm⁻²] [16]

Ein weiterer Vorteil durch den Einsatz des technischen Pflanzenhalms ist die relativ gute aerodynamische Eigenschaft der Verbindungsstange aufgrund ihrer runden Außenkontur im Vergleich zu dem eckigen Querschnitt des Referenzbauteils. Dadurch werden weniger Totwassergebiete rund um den Rear-Link induziert. Dies verdeutlicht

die folgende schematische Darstellung im BILD 17.

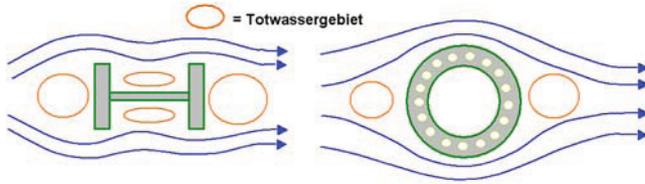


BILD 17. Umströmungsverhalten von dem mit Doppel-T Profil ausgelegten Rear-link (links) gegenüber einem aus technischem Pflanzenhalm (rechts)

Die dabei möglicherweise entstehenden Schwingungen der Verbindungsstange durch die Anregung der umströmenden Luftmasse sollen gedämpft bleiben, um ein ruhiges Laufverhalten der Landeklappe zu gewährleisten. Die dynamischen 3-Punkt-Biegeversuche zeigen, dass die technischen Pflanzenhalme aus GFK höhere Dämpfungsfaktoren aufweisen als Vollrohre mit der gleichen Fasermenge im Querschnitt (BILD 18).

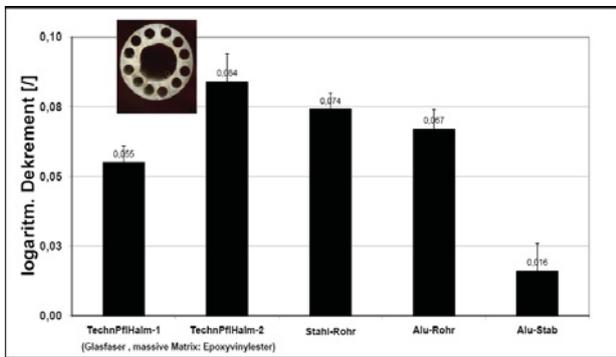


BILD 18. Schwingungsdämpfung tech. Pflanzenhalme aus GFK gegenüber metallischen Profilen [16]

Die statische Auslegung nach möglichen Lastfällen inklusive dem Störfall (*jamm*) ergibt eine ausreichende Festigkeit unter Berücksichtigung der Schadenstoleranz für primäre CFK-Strukturen (zulässige Dehnung, BILD 19).

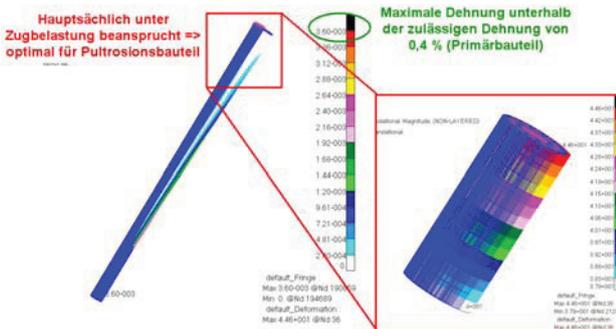


BILD 19. Der Störfall (*jamm case*) ergibt bei einer maximalen Zugdehnung von 3,6 μs eine noch ausreichende Festigkeitsreserve [9]

Zum Nachweis der Festigkeit gegen zyklische Lasten (*fatigue behaviour*) sollen 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt werden, bei dem Impactschäden jeweils im schubbelasteten und schubfreien Bereich der Biegeprobe eingebracht werden. Weiterhin soll bei dem Einsatz des Profils festgestellt werden, wie viele der CFK-Faserstränge beschädigt werden dürfen, damit dieser noch die Bemessungsbruchlast (*ultimate load*) sicher tragen kann.

4.3.2. Stützstrebe (Innenanwendung)

Neben der bereits benannten Außenanwendung als „Rear Link“ in der Ansteuerung einer Landeklappe eines großen Verkehrsflugzeugs, kommt auch eine Innenanwendung als Fußbodenstütze im Flugzeug-Frachtraum in Betracht. Diese Stützstreben verbinden die Struktur des Passagierfußbodens samt Querträger mit den Spanten und leiten damit die Gewichtslasten der Kabine weiter zur Rumpfschale (BILD 20). Sie sind im Besonderen bei der neueren CFK-Rumpfbauweise ein wesentliches Sicherheitselement für einen Stoßfall (*crash*). Bei einem Crash, beispielsweise bei einer Notlandung, soll über diese Stützen ein Großteil der auftretenden kinetischen Energien aufgenommen bzw. absorbiert werden. Durch den Einsatz eines technischen Pflanzenhalmprofils ist es möglich, eine wesentlich bessere Energieabsorption zu erreichen.

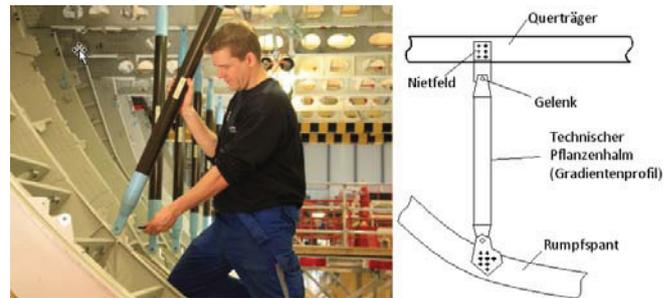


BILD 20. Die Installation einer Fußbodenstützstrebe für Airbus A380 (links) [17], und mögliche Variante aus dem technischen Pflanzenhalm (rechts)

Bei einer durch ein konventionelles Pultrusionsverfahren hergestellten Strebe besteht der lasttragende Körper aus einem Faserverbundrohr mit hauptsächlich UD-Fasern. Bei einer plötzlich auftretenden Drucklast brechen die Fasern ungerichtet aus dem Verbund aus, weil die Matrix nicht in der Lage ist, die quer zur Faser auftretenden Kräfte aufzunehmen. Sobald eine bestimmte Anfangsenergie erreicht wird, breiten sich die Risse entlang der Fasern mit relativ geringer Energieabsorption weiter aus. Dadurch verringert sich die Energieaufnahme nach dem ersten „Einreißen“ drastisch (abruptes Versagen) (BILD 21, links).

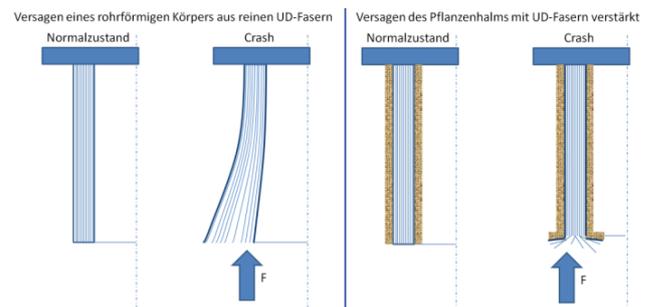


BILD 21. Das grobförmige Crashverhalten bei einer Strebe mit reinen UD-Fasern (links) und das feinförmige bei einem Gradientenprofil

Bei der Variante des Gradientenprofils, welches man modellhaft am besten mit in einem Gewebe eingebetteten UD-Fasern (BILD 21, rechts) beschreiben kann, wird der durch die Matrix gegebene Zusammenhalt zwischen den einzelnen Fasern durch die Umschlingung mit weiteren Fasern unterstützt. Die bei einem Crash auftretenden Energien ergeben eine Kraft in Umfangsrichtung und sor-

gen für einen Bruch der umschlingenden Fasern genau an den Stellen, wo sich diese kreuzen. Erst wenn sie gebrochen sind, beginnt wie bei der UD Strebe das Aufbrechen der Matrix quer zur Belastungsrichtung. Allerdings kann sich der interlaminare Riss nicht ungehindert ausbreiten, weil bereits durch den nächsten Knotenpunkt der umschlingenden Fasern die Ausbreitung behindert wird. Erst wenn auch die Fasern in diesem Knoten brechen, breitet sich der Riss weiter bis zum nächsten Knoten aus, wo er erneut verzögert wird. Durch dieses sequentielle Versagen wird bei gleicher Profillänge ein Vielfaches mehr an kinetische Energie absorbiert, als beim reinen UD-Profil. Ein solches Verhalten ist wichtig bei einer Notlandung eines Flugzeuges, wie es im folgenden BILD 22 simuliert wird.

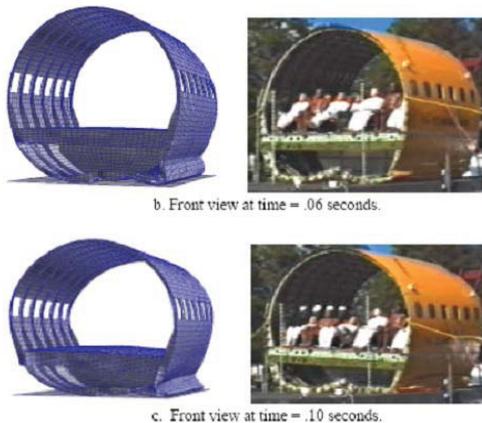


BILD 22. Simulation einer Notlandung: Das Crashverhalten unterer Rumpfsktion ist wesentlich [18]

Bei einem CFK-Rumpf sollen zusätzlich zur Steigerung des Crashverhaltens Crashelemente im unteren Schalenbereich installiert werden, die wiederum mit dem Prinzip „technischer Pflanzenhalm“ realisiert werden können.

Eine thermoplastische Matrix ist wesentlich schlagzäher als ein duroplastischer Werkstoff. Zudem sind die unidirektional ausgerichteten Fasern durch die äußere Ummantelung durch das Pflanzenhalmprofil vor mechanischen Beschädigungen geschützt. Demzufolge bietet der Einsatz einer thermoplastischen Matrix weitere wesentliche Vorteile im Bereich Schwingungsdämpfung und Impactschadensresistenz, welche im Flugzeugbau eine besonders wichtige Rolle spielt. Die Schwingungsdämpfung durch eine thermoplastische Fußbodenstützstrebe kann weiterhin den Komfort in der Passagierkabine verbessern.

5. FAZIT UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen unter Berücksichtigung der verwendeten Fasermaterialien ein hohes Potential für den Einsatz des technischen Pflanzenhalms in den vorgeschlagenen Hauptlasttragenden Verbindungsstrukturen: Landklappenverbindungsstange (*Rear link*) und Fußbodenstützstrebe. Eine weitere Implementierung in anderen Verbindungsstreben oder Profilstrukturen in der Luft- und Raumfahrttechnik ist durchaus denkbar.

Die Pflanzenwelt liefert wertvolle Hilfestellungen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Leichtbaustrukturen. Hierfür soll das abstrahierte Prinzip der bionischen Konzeptgeneratoren implementiert werden.

6. DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung der präsentierten Arbeiten (Förderkennzeichen 01RI0647A).

7. REFERENZEN

- [1] T. Speck: Funktionelle Morphologie und Bionik, Präsentation von Biokon e.V. bei Botanischem Garten der Universität Freiburg, 2010
- [2] O. Lilienthal: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, Berlin, 1889
- [3] H. Schlichting, E. Truckenbrodt: Aerodynamik des Flugzeuges, erster Band: Grundlagen aus der Strömungsmechanik. Aerodynamik des Tragflügels (Teil I), Springer, 2001
- [4] N. N.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Winglet>, Internetauftritt, Stand 01.08.2011
- [5] K. Richter: Das DLR-Leitprojekt "Adaptiver Flügel" (ADIF), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Hubschrauber, DLR, Göttingen, Internetauftritt, Stand 01.08.2011
- [6] C. Matheck: Verborgene Gestaltgesetze der Natur, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2006
- [7] T. Masselter, T. Speck: Biomimetic Fiber-Reinforced Compound Materials, Advances in Biomimetic, 2011
- [8] O. Speck, M. Milwich, D. Harder, T. Speck: Vom biologischen Vorbild zum technischen Produkt: der "Technische Pflanzenhalm", Museo, 22: 96-103, 2005
- [9] C. Fastert, I. Zuardy, H. Purol: Untersuchung der Anwendbarkeit des technischen Pflanzenhalms in der Luftfahrt, Präsentation bei internen Projekttreffen, Denkendorf, 2010
- [10] M. Milwich, H. Plank: Increasing the functionality of (textile) composites, Technical Conference, SAMPE Chapter Swiss, 2011
- [11] H. Purol, A. Stieglitz, P. Woizeschke, A. S. Herrmann: Beschleunigte Prozessketten für die Herstellung von CFK-Spanten in höher Stückzahl, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), Hamburg, 2010
- [12] N. N.: Zug-Druck-Stange aus Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, Gummi-Metall-Technik (GMT) GmbH, DE 20 2010 006 303, Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA), 2010
- [13] T. Lippert, H. Michel, U. Strasser: Verfahren zur Herstellung faserverstärkter Hohlkörper, MT Aerospace AG, DE 10 2007 015 909 A1, Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA), 2007
- [14] M. Milwich, H. Planck, T. Speck & O. Speck: Der technische Pflanzenhalm: ein bionisches Schmaltextil, Band- und Flechtindustrie, Melliand Textilberichte, 44/2: 34–38, 2007
- [15] M. Milwich et al.: Projektzwischenbericht, Entwicklung von neuen Faserverbundprofilen mit hohem Leichtbaupotenzial und Knickfestigkeit nach dem Vorbild von Pflanzenhalmen, BmBF, 2010
- [16] T. Speck, S. Busch: Erste Analysen zur Mechanik des technischen Pflanzenhalms, Präsentation bei internen Projekttreffen, Denkendorf, 2010
- [17] N. N.: AIRBUS One Online, Artikel: „Schluss mit Mikado“ vom 14.12.2010
- [18] E. L. Fasanella, K. E. Jackson, Y. T. Jones, G. Frings, T. Vu: Crash Simulation of a Boeing 737 Fuselage Section Vertical Drop Test, Proceedings of the Third KRASH User's Conference, 2001