

FLEXIBLE POSITIONIERUNG VON MODULAREN KABINENMONUMENTEN DURCH INNOVATIVE ANBINDUNGEN IN LEICHTBAUWEISE

D. Krause, B. Plaumann, T. Gumpinger, H. Jonas,
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT), Technische Universität
Hamburg-Harburg (TUHH), Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Zur Schaffung von Alleinstellungsmerkmalen setzen Airlines im intensiven Wettbewerb zunehmend auf stärkere Individualisierung. Hersteller und Zulieferer können diese Wünsche nach externer Vielfalt durch eine konsequent modular aufgebaute Produktarchitektur der Kabinenmonumente bei geringer interner Komponentenvielfalt umsetzen. Kombiniert mit einer möglichst freien Positionierung sind anforderungsgerechte Kabinenlayouts möglich. In der Luftfahrt konkurriert solch eine Flexibilität jedoch mit der Basisanforderung der Gewichtsminimierung, da Treibstoffkosten als Hauptbestandteil der Betriebskosten durch eine Reduzierung des Fluggewichts gesenkt werden. Als Beitrag zur Lösung dieses Zielkonflikts und als Beispiel im Rahmen der am Institut PKT erarbeiteten Methode zur Entwicklung leichter, modularer Produktstrukturen wurde ein neuartiges Konzept zur Anbindung einer Flugzeughordküche (Galley) an die tragende Struktur entwickelt. Die obere Anbindung (Upper Attachment) von Kabinenmonumenten an die tragende Flugzeugstruktur weist typischerweise eine hohe Varianz auf, da durch diese Anbindung verschiedenste Positionen im Flugzeug entlang der Längsachse realisiert werden müssen. Entsprechend der Anforderungen einer flexiblen Positionierung wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, bewertet und ausgearbeitet. Neben der flexiblen Positionierung standen konsequenter Leichtbau, Minimierung von Bauvolumen und Teileanzahl im Vordergrund der Entwicklung.

Je nach Ausführung innerhalb der Produktfamilie müssen Anforderungen aus verschiedensten Lastfällen unter Berücksichtigung der Kombinatorik der Varianz von Geometrie und Lastfällen erfüllt werden. Bislang wird für jede Variante eine individuelle obere Anbindung mit hohem Fräsaufwand und geringer Gleichteileanzahl gefertigt. Das neue Attachment ermöglicht mit drei verschiedenen Standardfrästeilen und einem Standardhohlprofil die benötigte flexible Positionierung bei einem minimalen Bauvolumen und 50% weniger Gewicht. Eine Auslegung mit Hilfe numerischer Simulationen wird im Beitrag ebenso vorgestellt wie die Verwendung der flexiblen Attachments in einer Gesamt-Modulbauweise für Kabinenmonumente.

1. EINLEITUNG

Im heute vorherrschenden intensiven Wettbewerb versuchen sich Airlines durch individuelle Merkmale von der Konkurrenz abzusetzen. Dabei spielen Flugpreis, Komfort und zunehmend auch Umweltverträglichkeit eine wichtige Rolle. Um hierfür klare Alleinstellungsmerkmale mit wirtschaftlichen Vorteilen ableiten zu können, wird von den Airlines zunehmend eine Individualisierung der Kabine und der Dienstleistungen forciert. Um individuelle Kabinenlayouts wirtschaftlich interessant realisieren zu können, ist eine hohe Flexibilität gefordert. Diese soll nicht nur eine möglichst hohe Vielfalt an Kombinationen bei der Erstausrüstung, sondern auch bei späteren Umrüstungen, wie z.B. Eignerwechsel, Wechsel der Streckenführung und Umstellung zwischen Winter- und Sommerflugplänen ermöglichen. Die letztgenannte Rekonfigurierbarkeit wird zunehmend stärker neben der ohnehin hohen Vielfalt bei der Erstkonfiguration gefordert. Die von den Airlines geforderte Vielfalt muss vom Flugzeughersteller und damit auch den Zulieferern der Komponenten realisiert werden.

Um die Passagiere während des Fluges mit heißen und kalten Getränken sowie Mahlzeiten versorgen zu können, besitzen Verkehrsflugzeuge üblicherweise mehrere Flugzeugküchen (Galleys). Dieser Beitrag bezieht sich auf

die Anbindung einer solchen Galley an die Flugzeugstruktur.

1.1. Leichtbau

Leichtbau mit dem Ziel der Reduzierung des Eigengewichts stellt in der Luftfahrt einen ökonomischen Zwang dar, da bei geringeren zu bewegendenden Massen auch der Energieeinsatz beim Vortrieb sinkt. Der Energieeinsatz fließt dabei direkt über den Treibstoffverbrauch in die Betriebskosten ein, die dem Flugzeugbetreiber (Airline) entstehen. Die Airlines haben also ein starkes Interesse an geringen Eigengewichten der Flugzeuge.

Leichtbau kann unter verschiedenen Aspekten betrachtet und die Gewichtssenkung in verschiedenen Ansätzen realisiert werden. Es wird unterschieden in Material-, Struktur- und Systemleichtbau. Im Materialleichtbau wird versucht, durch den Einsatz von leistungsfähigerem Material Gewicht zu sparen. Strukturleichtbau beschreibt die Reduzierung von unnötigem Material bei Erfüllung der Funktion mit entsprechenden Hilfsmitteln wie der Topologieoptimierung. Im Systemleichtbau wird bei der Funktionsintegration versucht, möglichst viele Funktionen in möglichst wenig Teile zu integrieren, so dass das

Gesamtgewicht sinkt. Alle drei Bereiche des Leichtbaus sind begrenzt durch die Machbarkeit in der Fertigung. Hierbei spielen die Kosten der Realisierung eine entscheidende Rolle. Die verschiedenen Bereiche sind in Bild 1 dargestellt.

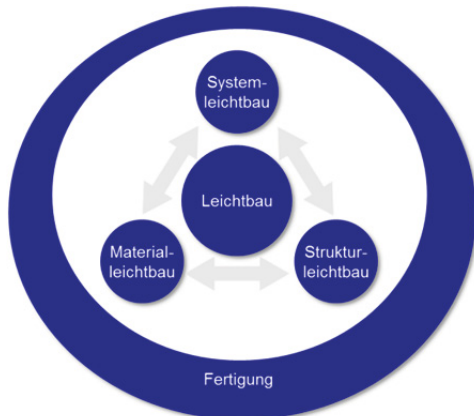


Bild 1: Verschiedene Bereiche des Leichtbaus, siehe auch GUMPINGER in [1].

Weitere Ansatzpunkte für konsequenten Leichtbau liegen in Unsicherheiten begründet. SCHÜRMANN [2] nennt hier unter anderem den Leichtbau durch detaillierte mechanische Analyse.

So kann Leichtbaupotential dadurch erschlossen werden, dass eine detailliertere mechanische Analyse durchgeführt wird. Da Festigkeits- und Verformungsnachweise aus Kostengründen in den meisten Fällen zunächst in der Simulation geführt werden und nur abschließend in wenigen Versuchen konservativ abgesichert werden, spielen Unsicherheiten bei Annahmen und Abschätzung eine wichtige Rolle. Werden bestimmte Details in der Modellierung vereinfacht, wie z.B. durch eine Linearisierung oder durch Aufbringung einer statischen Last für eigentlich dynamische Lastfälle, so wird häufig ein Sicherheitsfaktor hinzugefügt. Diese Sicherheitszuschläge dienen der Absicherung gegenüber Ungenauigkeiten bei der Bestimmung und Modellierung der entsprechenden Belastungssituationen. Sie beruhen häufig auf Erfahrungen und empirischen Untersuchungen.

Wird allerdings nach Vorauslegung, Grobanalyse und Parametervariation bei der konstruktiven Ausgestaltung eine detailliertere Feinanalyse durchgeführt, so gilt hier, dass je realistischer eine Struktur modelliert werden kann, umso besser auch die Beanspruchungen prognostiziert werden können [2].

Die verschiedenen Ansätze zum Leichtbau wurden bei der Entwicklung der flexiblen Anbindung konsequent an geeigneten Stellen eingesetzt um so das Gesamtgewicht einer Anbindung von Kabinenmonumenten zu senken.

1.2. Modulare Produktstrukturen

Durch modulare Produktstrukturen können verschiedene Entwicklungs- und Unternehmensziele unterstützt werden. Auf wirtschaftlicher und produktionstechnischer Seite führt idealerweise die Wiederverwendung von standardisierten Modulen zu einer Komplexitätsreduzierung und der Erschließung von Skaleneffekten. Technologisch können Einzelziele, wie z.B. Recycling, separates Testen oder Endmontage, unterstützt werden. Letztlich bieten modular gestaltete Produktfamilien auch dem Kunden Vorteile

durch die Möglichkeit aus vordefinierten Konfigurationskatalogen auszuwählen und einen einfachen späteren Modulaustausch, z.B. für Wartung oder Upgrades, durchführen zu können.

Mit der am Institut PKT entwickelten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien kann die interne Variantenvielfalt durch modular aufgebaute Produktstrukturen auf ein sinnvolles Maß eingeschränkt werden ohne die notwendige externe Vielfalt zu reduzieren [3], [4].

Insbesondere bei Flugzeuginterieur-Produkten, wie z.B. Galleys, muss berücksichtigt werden, dass individuelle Kundenanforderungen, also Abweichungen von vordefinierten Konfigurationen, konstruktiv umsetzbar bleiben. Im Rahmen des Projektes FlexGalley¹ wurden hierzu Modulkonzepte für verschiedene Produkttypen ausgearbeitet und in Form von Funktionsdemonstratoren umgesetzt [5]. Ziel ist es dabei, modulare und flexibel positionierbare Galleys bereitzustellen (Bild 2). Durch die Entwicklung von innovativen bauraum- und gewichtsneutralen produktinternen Schnittstellen können so verschiedene Konfigurationen vorentwickelt werden. Der Kunde, in der Regel die Airline, hat darüber hinaus die Möglichkeit durch Modulaustausch die Galleykonfiguration routenabhängig, z.B. von Sommer- auf Winterflugplan, umzustellen.

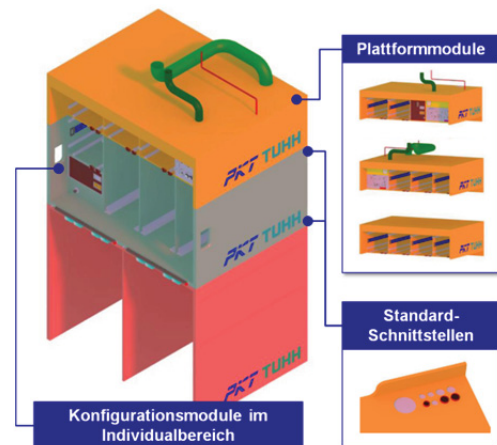


Bild 2: Modulkonzept am Beispiel Centre-Galley, [5]

Neben den vordefinierten Modulen können durch Nutzung der standardisierten Schnittstellen auch kundenindividuell Module konstruiert und mit vertretbarem Aufwand realisiert werden.

1.3. Modulleichtbau

Im Modulleichtbau müssen modular strukturierte Produkte den Anforderungen eines konsequenten Leichtbaus genügen. Modulare Produktstrukturen verursachen meist zusätzliches Gewicht, zum einen durch zusätzliche Schnittstellen und zum anderen durch eine Überdimensionierung der Module, um die Festigkeit in den unterschiedlichen Konfigurationen zu gewährleisten.

¹ „FlexGalley – Innovative Bauweise von Galleys durch eine modularisierte Baustruktur und flexible Positionierung (Teilprojekte I und II)“ ist ein von der Behörde für Wirtschaft und Arbeit der Freien und Hansestadt Hamburg (BWA HH) im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms Hamburg gefördertes Verbundprojekt in Kooperation mit Fa. Mühlenberg Interiors GmbH und Co. KG.

Die Gewichtszunahme bewegter Komponenten erhöht die Lasten auf die umgebende Struktur. Diese zusätzlichen Lasten sind durch Verstärkung abzufangen, dadurch erhöht sich das Gewicht weiter. Es entsteht ein schneeballartiger Effekt. Innerhalb einer modularisierten Produktfamilie besteht eine große Anzahl von nicht überschaubaren Lastabhängigkeiten. Der Schneeball-effekt von Erhöhungen der Einzelmassen macht sich hier weiter bemerkbar, da sich eine Gewichtsänderung in einer modularen Produktstruktur nicht auf ein einzelnes Produkt beschränkt. Die teils zirkularen Bezüge von Modulgewicht und Last werden in Bild 3 für eine vereinfachte Galleyproduktfamilie dargestellt. Der Module-Interface-Graph (MIG) zeigt die einzelnen Varianten und Module [6]. Diese Darstellung kann zu einem Node-Link-Diagramm überführt werden, in welchem die Geometrie vernachlässigt wird. Die expandierte Betrachtung der überlagerten Node-Link Diagramme zeigt die variantenübergreifende Verwendung der Module. Mit diesen Informationen wird eine analytische Nachverfolgung der Lasten über Produktvariantengrenzen hinweg angestoßen. Die weitere Aufbereitung der Zusammenhänge in einer drei-dimensionalen Design Structure Matrix (DSM) ist ein zentraler Ansatz zur effizienten Gewichtoptimierung. Durch eine iterative Anpassung der Struktur und damit des Gewichts werden die Module auf die Produktvarianten hin abgestimmt. Es wird dadurch eine Minimierung der Überdimensionierung erreicht.

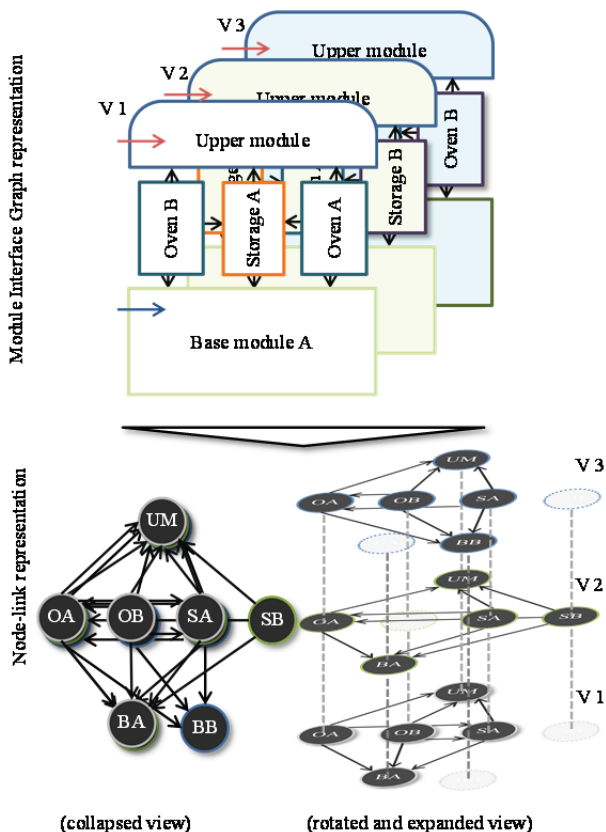


Bild 3: Darstellung der Lastabhängigkeiten einer vereinfachten Galleyproduktfamilie.

Durch die Wiederverwendung der Module lassen sich Skaleneffekte erzielen. Der erhöhte Aufwand in der Konstruktion und Fertigung amortisiert sich über Losgrößeneffekte. Mit dem erläuterten Systemmodell lässt

sich eine Sensitivitätsanalyse bzgl. Gewichtsveränderungen auf Modulebene durchführen. Gewichtet man diese mit einem geschätzten Aufwand zur Optimierung und der Verkaufszahlenprognose der Varianten, so lassen sich die Module mit der höchsten Gewichtoptimierungseffizienz auffinden. Dadurch können die Vorteile der Modularisierung den Mehraufwand zur Gewichtsreduktion kompensieren.

1.4. Flexible Positionierung von Kabinenmonumenten

Im Rahmen des Projekts FlexGalley wird die Anbindung solcher Kabinenmonumente hinsichtlich einer modular aufgebauten Produktfamilie und einer flexiblen Positionierung untersucht.

Insbesondere bei Mittel- und Langstreckenflügen in Flugzeugen mit „Wide-Body“-Rümpfen sind Galleys an mehreren Stellen in der Kabine zu finden. Die folgende Betrachtung bezieht sich speziell auf Centre Galleys (Bild 5), also Bordküchen, welche in der Mitte zwischen zwei Gängen eingebaut werden. Die Konzepte und Entwürfe lassen sich allerdings auch auf andere obere Anbindungen, wie seitliche Galleys und Stowages übertragen.

Ziel ist es, eine Galley möglichst frei entlang der Gänge verschieben zu können, um individuelle und der Einsatzsituation exakt angepasste Kabinenlayouts bei möglichst geringem Gewicht zu realisieren, siehe Bild 4.

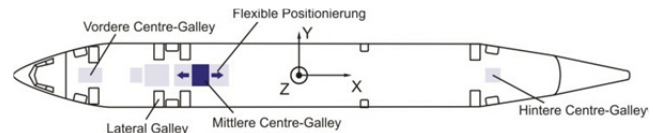


Bild 4: Beispielhafte Standorte für Centre-Galleys in Widebody-Kabine.

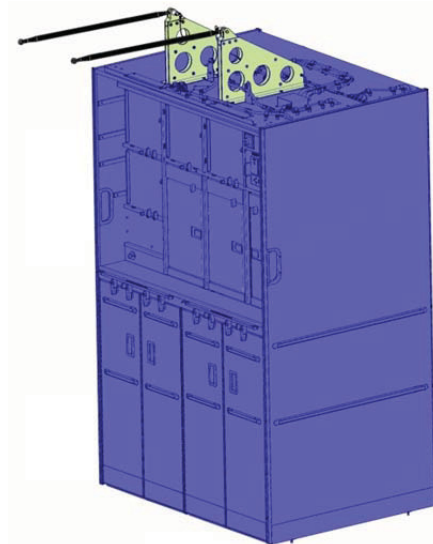


Bild 5: Centre Galley mit Upper Attachment (grün). Quelle: Mühlenberg Interiors

Die Galleys werden an der Unterseite über Stiftverbindungen (Hardpoints) mit entsprechend verstärkten Buchsen im Kabinenboden befestigt. Auf der Oberseite findet sich weiterhin die obere Anbindung (Upper Attachment) zur Befestigung an der tragenden

Flugzeugstruktur. Üblicherweise nimmt die obere Anbindung nur Kräfte in Flugzeuginnenrichtung auf und soll so im Fall einer Notlandung die Galley zusätzlich fixieren.

In Bild 6 wird die Anbindung einer Galley (blau) auf der Oberseite an die Flugzeugstruktur (grau) verdeutlicht. Das auf der Galley befestigte Upper Attachment (grün) wird über Stangenverbinder (Tie Rods, schwarz), mit der tragenden Flugzeugstruktur verbunden.

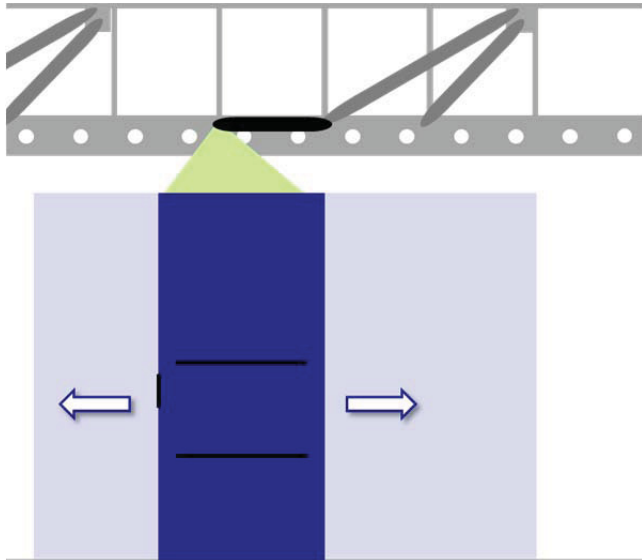


Bild 6: Flexible Positionierung einer Galley (blau) mit Upper Attachment (grün) und Tie Rods (schwarz).

Die Anschlagpunkte an die Struktur des Flugzeugrumpfes mit seinen Stringern und Spanten ist seitens des Flugzeugherstellers vorgegeben. Die zur Verbindung zwischen Attachment und Struktur verwendeten Tie Rods sind allerdings nur in bestimmten Längen verfügbar und zertifiziert. Knickversagen bei ungünstigen Lastfällen stellt eine wesentliche Beschränkung der Maximallänge bei der Auslegung der Tie Rods dar. Um trotzdem eine hochflexible Positionierung zu ermöglichen, muss das Upper Attachment die flexible Positionierung unterstützen, indem es je nach Anforderung unterschiedliche Längen zum Anschlagpunkt ausgleicht.

Das verfolgte Vorgehen basiert auf einer Verlagerung der Variantenvielfalt von den Galleys weg zu den universellen Verbindungselementen. Die Galley-Produktfamilie besitzt damit nur möglichst einheitliche Anschlusspositionen für die Attachments. Die Variantenvielfalt der Anbindung, welche aus der flexiblen Positionierung resultiert, existiert damit nur bei den Attachments. Der Aufwand in Herstellung, Berechnung und Zertifizierung der Galleys wird so deutlich verringert, da der Variantentreiber flexible Positionierung für die Galleys selbst entfällt. Für die in Herstellung, Berechnung und Zertifizierung deutlich besser überschaubaren Attachments erhöht sich die Variantenvielfalt zwar, jedoch sind hier die Prozesse deutlich übersichtlicher und die Zunahme des Aufwandes geringer als bei den Galleys. Zudem kann durch ein geschickt auf Geometrieanforderungen und Lastfälle ausgelegtes Konzept aus standardisierten Elementen die Auswirkung der Vielfalt der Attachments und deren Fertigung einzig auf einfache Fertigungsprozesse wie das Ablängen von Standardprofilen reduziert werden.

1.5. Varianz der Geometrie

Die Realisierung der hohen Positionierflexibilität bei wenigen verfügbaren Tie-Rod-Längen und Anschlagpunkten führt beim Projektpartner Mühlenberg zu einem hochvarianten Upper Attachment. Die hohe Varianz ist den vielfältigen Positionierungswünschen geschuldet und multipliziert sich mit jedem Produkttyp. Allein für Centre Galleys im Airbus A330 ergibt sich die in Bild 7 dargestellte Vielfalt an Upper Attachments.

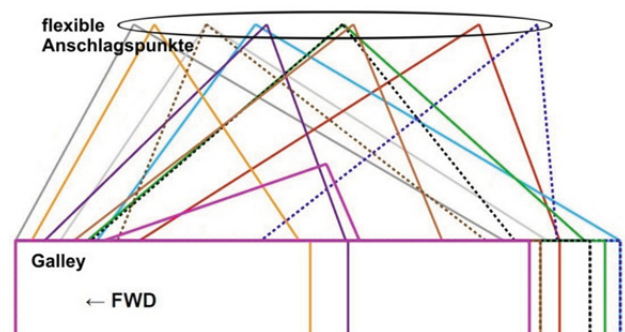


Bild 7: Beispielhafte Vielfalt der Geometrien von Upper Attachments für Centre Galleys.

Diese externe Vielfalt wird bislang 1:1 intern, also in eigenen konstruktiven Varianten, abgebildet. Die meisten Attachments werden aus gekanteten und gefrästen Plattenkörpern in Verbindung mit einem integralen, gefrästen Anschlussstück mit Niet und Schraubverbindungen zusammengesetzt (Bild 8). Teilweise werden bestimmte Anbindungs-Geometrien sogar durch ein einziges Integral-Frästeil mit sehr hohem Fräsaufwand realisiert. Diese Vielfalt an unterschiedlichen Attachments mit geringem Gleichteileanteil ist ungünstig zu beherrschen und führt zu einem hohen Aufwand bei individueller Fertigung. Weiterhin sind durch die vielfältigen Varianten Optimierungsprozesse hinsichtlich Leichtbau häufig nicht durchgeführt worden. Die Teile sind mit einer hohen Überdimensionierung für Unsicherheiten bei der Auslegung behaftet und damit unnötig schwer.

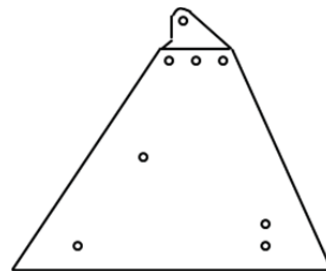


Bild 8: Beispielhaftes Attachment beim Projektpartner.

Eine flexibel einsetzbare Lösung sollte die notwendigen verschiedenen Geometrien mit einem möglichst hohen Anteil an Gleichteilen bei geringem Gewicht ermöglichen.

1.6. Varianz der Lastfälle

Für die betrachteten Centre Galleys wurden aus den von Airbus vorgegeben Spezifikationen 32 Lastfälle identifiziert. Hieraus konnten neun verschiedene Lastfälle ermittelt werden, welche bei der Auslegung zu berücksichtigen sind (Bild 9). Grundsätzlich ist allerdings zu beachten, dass je nach Attachment-Geometrie und

jeweiliger Ausführung unterschiedliche Lastfälle den Worst-Case-Fall darstellen.

SUMME VERSCH LASTFÄLLE	9			
ZUSAMMENSTELLUNG		FX [daN]	FY [daN]	FZ [daN]
mit Fitting Factor 1,33	Lastfall A1.1.1	-3990	0	0
	Lastfall A1.1.2	-3990	0	-456,19
	Lastfall A1.1.3	-3990	0	456,19
	Lastfall A2.1.1	-2660	-1330	0
	Lastfall A2.1.2	-2660	-1330	-456,19
	Lastfall A2.1.3	-2660	-1330	456,19
	Lastfall A3.1.1	1995	-1330	0
	Lastfall A3.1.2	1995	-1330	-456,19
	Lastfall A3.1.3	1995	-1330	456,19

Bild 9: Ausschnitt unterschiedlicher Lastfälle für die betrachteten Galleys nach Airbus Spezifikation.

Die höchsten Einzelkräfte treten in Flugzeug-Längsrichtung (X-Achse) auf. Diese Kräfte entsprechen den in den von den Behörden FAA und EASA in den Richtlinien FAR25 [7] bzw. CS25 [8] vorgeschriebenen maximalen Beschleunigung im Fall einer Notlandung mit Verrechnung der maximal zulässigen Masse der jeweiligen Komponente und einem Fitting Factor. Weiterhin können noch seitliche Kräfte (Y-Achse) an der oberen Anbindung auftreten, wenn eine Schubplatte (Tie Plate) an Stelle eines Tie Rods zur Anbindung verwendet wird. Der Einsatz von Tie Plates ist allerdings nur noch extrem selten, weswegen dieser Lastfall bei der Entwicklung eines möglichst flexibel einsetzbaren Upper Attachments zwar mitberücksichtigt wird, allerdings nicht im Vordergrund steht. Lasten in Y-Richtung sind bei Verwendung von Tie Rods bei Galley-Anbindungen wie in Bild 5 nicht möglich. Die geringen Kräfte vertikale Richtung (Z-Achse) resultieren aus einem möglichen vertikalen Winkelsatz der Tie Rods.

2. ENTWICKLUNG EINER FLEXIBLEN ANBINDUNG

Für das oben beschriebene Ausgangsproblem der verschiedenen benötigten Geometrien unter verschiedensten Lastfällen wurde ein universell einsetzbares, flexibles Befestigungssystem für das Upper Attachment mit wenigen Standardteilen für die Massenproduktion entwickelt. Dabei wurde auf eine Kompatibilität zu bestehenden Vorschriften und Lösungen seitens der Behörden bzw. der Flugzeughersteller geachtet. Damit ist eine Umsetzung der Entwicklungsergebnisse in die Praxis gut realisierbar um so einen wirtschaftlichen Vorteil für die beteiligten Unternehmen zu ermöglichen.

2.1. Lösungskonzepte

Nach Aufnahme der Anforderungen wurden Funktionen erarbeitet, welche durch grundlegende Funktionsträger in einem Konzept realisiert werden müssen. Zur Generierung verschiedener möglicher Konzepte wurden unterschiedliche Teillösungen in einem morphologischen Kasten variiert. Aus der großen Anzahl der theoretisch möglichen Teillösungen wurden einige Konzepte zunächst näher ausgearbeitet, wie in Bild 10 dargestellt.

Für eine umfangreiche Bewertung der Konzepte wurden zunächst Zielvorstellungen aufgestellt und daraus Bewertungskriterien abgeleitet. Diese wurden zur Bewertung der betrachteten Konzepte hinsichtlich ihrer technischen und ihrer kaufmännischen Wertigkeit herangezogen. Nach einer abschließenden Gegenüberstellung der bestbewerteten Lösungen wurde

das in Bild 10 mittig dargestellte Konzept für eine weitere Ausarbeitung ausgewählt.

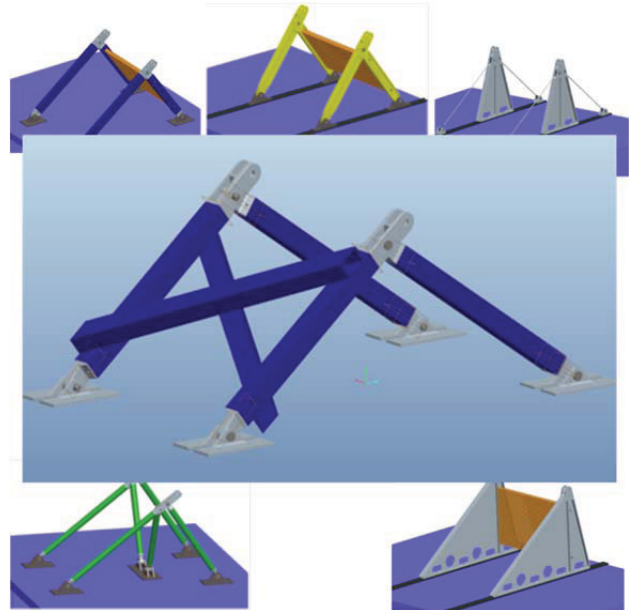


Bild 10: Verschiedene erarbeitete Lösungskonzepte.

Das gewählte Konzept besteht aus quadratischen Hohlprofilen, welche entsprechend der benötigten Länge zugeschnitten werden können. Die Hohlprofile werden vor dem Leichtbau-Hintergrund aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) in überwiegend unidirektionaler Längsausrichtung hergestellt. Zwar bietet kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK) ein noch höheres Leichtbaupotential, allerdings ist der zusätzliche Gewichtsvorteil gegenüber GFK-Hohlprofilen bei Betrachtung des Gesamtgewichts des Attachments mit seinen Verbindungselementen nur begrenzt, während die Kosten deutlich steigen. Weiterhin treten bei einer direkten CFK-Aluminium-Verbindung Korrosionsprobleme auf. Die Verbindung zwischen den Hohlprofilen wird über einheitliche Integralfrästeile realisiert. Das Konzept kommt dabei mit drei verschiedenen Standardteilen aus, welche in großer Stückzahl unter Ausnutzung von Skaleneffekten kostengünstig gefertigt werden können. Als Werkstoff bietet sich hierfür eine hochfeste Aluminiumlegierung an. Die drei unterschiedlichen Verbindungselemente des universellen Attachment-Konzepts sind in Bild 11 als fertige Frästeile abgebildet.



Bild 11: Die drei benötigten standardisierten Elemente für das neue Upper Attachment.

Bei diesem Konzept wurden mehrere Bereiche des Leichtbaus, wie in Bild 1 gezeigt, berücksichtigt. Die Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden für die Hohlprofile fällt in den Bereich Materialleichtbau, da die

Fasern als tragende Elemente des Verbundes sehr gut entsprechend der Beanspruchungen im stabförmigen Bauteil ausgerichtet werden können. So werden die hohen Steifigkeits- und Festigkeitswerte in Richtung der Fasern bei dem geringem Gewicht ideal genutzt gegenüber homogenen Werkstoffen mit isotroper Verteilung der Werkstoffkennwerte. Bei den Verbindungselementen zwischen den Streben treten je nach Lastfall sehr unterschiedliche Lastpfade auf, weshalb sich hier ein homogener Werkstoff mit hohen Festigkeitswerten bei geringer Dichte, wie z.B. Aluminium, im Sinne des Materialleichtbaus hervorragend eignet. Da bei Aluminium je nach Legierung und Nachbehandlung große Unterschiede bei den Festigkeitswerten existieren, wurde eine hochfeste Legierung mit entsprechender Wärmenachbehandlung ausgewählt.

In den Bereich des Strukturleichtbaus fällt die Reduzierung der Struktur zu einem Stabwerk entsprechend der maximalen Lastpfade. Eine Topologie-Optimierung führt ebenfalls zu diesem Optimalfall der direkten Kraftleitung auf möglichst kurzen, geraden Weg zwischen Einleitung und Ausleitung.

Das Konzept wurde zum Patent angemeldet [9].

Konzeption des Querverbinders

Grundsätzlich kann statt eines Tie Rods auch eine Schubplatte, Tie Plate genannt, zur oberen Anbindung der Galley verwendet werden. Diese kann neben Zug-/Druckkräften auch seitliche Kräfte in Y-Richtung übertragen. Die Tie Plate-Möglichkeit wird sehr selten angewandt, soll aber grundsätzlich mit berücksichtigt werden. Eine Abstützung gegen seitliche Kräfte in Y-Richtung sollte dabei ohne zusätzliche Anschlagpunkte auf der Galley auskommen, um eine flexible Verwendung bei gleichzeitiger Verringerung der Variantenvielfalt bei den Galleys zu realisieren.

Eine Realisierung mit einer faserverstärkten Leichtbauplatte in Sandwichbauweise zwischen den Rahmen weist dabei prinzipiell den Nachteil auf, einen großen Teil des Raums über der Galley zu versperren.

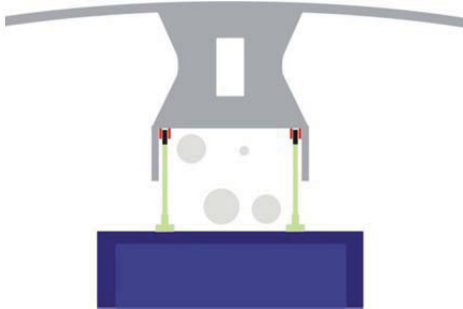


Bild 12: Obere Anbindung (grün), Galley (blau), tragende Struktur mit Versorgungsleitungen (grau).

Wie in Bild 12 dargestellt, werden hier üblicherweise zahlreiche Versorgungsleitungen entlanggeführt, was durch einen Abschluss der Fläche innerhalb des Attachments deutlich erschwert wäre. Eine Verwendung aus zurechtgeschnittenen FKV-Platten ist wegen der Knickgefahr bei geringen Wandstärken nicht sinnvoll, so dass Hohlprofile gewählt wurden. Diese können bei Bedarf, also im Falle einer Tie Plate, auf die Ober- bzw. Unterseite der kürzeren Tragprofile aufgeklebt werden. Aus Gründen der Einfachheit kann das gleiche

Standardprofil wie bei den übrigen Tragrahmen verwendet werden. Die beschriebenen Möglichkeiten (Sandwichplatte, Plattenzuschnitt, Hohlprofile) sind von links nach rechts in Bild 13 dargestellt.

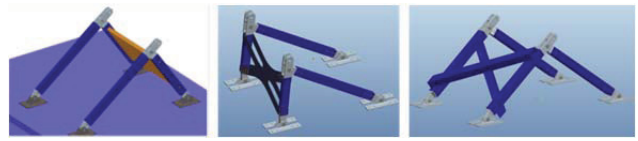


Bild 13: Verschiedene Konzepte zur Realisierung des Querverbinders.

2.2. Auslegung

Die Auslegung des entwickelten Konzepts erfolgte mit Hilfe von Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode. Im Folgenden wird auf einige besondere Punkte der Auslegung eingegangen. In Bild 14 dargestellt ist die eine Stellung in maximaler Auslenkung mit maximaler Belastung des senkrecht stehenden Profils und der anliegenden Verbindungen zwischen Hohlprofil und Anbindungselement.

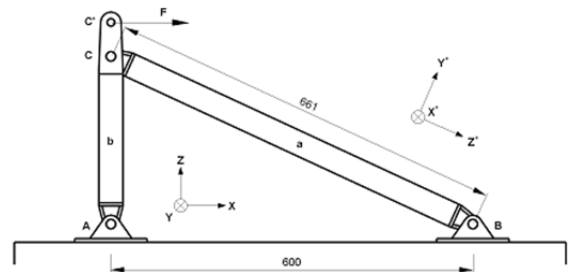


Bild 14: Eine Variation des neuen Attachment-Konzepts in Stellung maximaler Auslenkung.

2.2.1. Randbedingungen der Auslegung

Wesentliche Anforderungen für die Auslegung resultieren aus den verschiedenen Lastfällen und zu realisierenden Geometrien, wie in Kapitel 1.5 und 1.6 beschrieben.

Zusätzlich zu den zu realisierenden Anbindungspositionen ist allerdings der Bauraum des Attachments seitlich nach außen und im Innenraum stark eingeschränkt, siehe auch Bild 4 und Bild 12. Die seitliche Einschränkung nach außen führte zur Notwendigkeit eines leicht asymmetrischen Aufbaus mit einem Versatz der tragenden Hohlprofile nach innen um eine ausreichend hohe Festigkeit zu realisieren und gleichzeitig dem Leichtbau durch Wahl möglichst idealer Hohlprofilquerschnitte Rechnung zu tragen. Trotzdem konnte eine universelle Verwendbarkeit mit drei unterschiedlichen Verbindungselementen realisiert werden.

2.2.2. Kombinatorik von Geometrie und Lastfall

Die für die Auslegung relevanten, jeweils kritischen Lastfälle unterscheiden sich auch bei demselben Konzept je nach zu realisierender Geometrie. So ist bei in X-Richtung weiter aufgestellten Attachments mit in Längsrichtung überwiegend mittigem Kraftangriff eine seitliche Krafteinleitung aus einer Tie Plate kritisch, siehe links in Bild 15. Bei in Längsrichtung eng stehenden Attachments mit Kraftangriff ganz vorn oder ganz hinten ist der Zug in Längsrichtung hingegen auslegungsrelevanter Lastfall, siehe Bild 15 rechts.



Bild 15: Kritischer Lastfall links: seitliche Belastung, kritischer Lastfall rechts: maximale Last in X-Richtung

Die Auswirkungen von kombinatorischen Effekten der geometrischen Vielfalt von Varianten und den relevanten Lastfällen auf den Auslegungsprozess werden umso stärker, je variantenreicher die Produktstruktur gestaltet ist. Eine Beherrschbarmachung von modular aufgebauten Produktstrukturen mit hoher kombinatorischer Vielfalt in der konstruktiven Auslegung mit Simulation und Test soll in einem zukünftigen Forschungsprojekt erforscht werden.

2.3. Auslegung mit Hilfe von FEM

In einer vorgelagerten Grobdimensionierung wurden Materialeignung und ungefähre Profilquerschnitte zunächst rechnerisch für die verschiedenen Geometrien unter idealisierten lastfallabhängigen Beanspruchungen im Bauteil abgeschätzt.

Um die vielfältigen kombinatorischen Möglichkeiten von Attachment-Geometrie und jeweiligem kritischem Lastfall in der Auslegung zu berücksichtigen, wurde für die erste Dimensionierung die mit dem CAD-System ProEngineer eng verknüpfte FEM-Software Mechanica verwendet (Bild 16). Dieses Vorgehen war notwendig geworden, da 15 verschiedene Lastfälle für mehr als zehn verschiedene Geometrien von Attachments betrachtet werden mussten. Die daraus resultierende kombinatorische Vielfalt konnte in qualitativen Abschätzungen mit Hilfe der CAD-nahen FEM-Umgebung ProEngineer-Mechanica auf wesentliche Worst-Case-Kombinationen von Lastfällen und Geometrie verringert werden. Weiterhin konnten Iterationsschleifen zur Anpassung bei einer ersten Grobdimensionierung möglichst kurz gehalten werden.

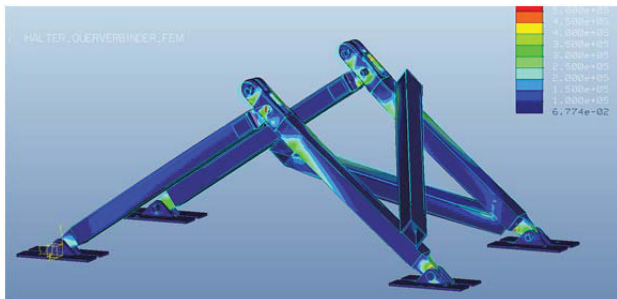


Bild 16: Auslegung in einer Simulation mit der Finite-Elemente-Methode

Abschließend wurde in einem Nachweis die zuvor identifizierten kritischen Lastfall-Geometrie-Kombinationen mit detaillierterer Modellierung (FKV-Materialmodelle und

besserer kinematischer Kopplung) betrachtet. Zum Einsatz kam hier die FEM-Software HyperWorks von Altair Engineering, wie beispielsweise in Bild 18 dargestellt.

Um vertrauenswürdige Ergebnisse und damit zuverlässige Prognosen zu Spannungen und Verformungen aus der Simulation zu erhalten, muss eine geeignete Modellierung des Problems gewählt werden. Hierbei spielt vor allem die Materialmodellierung der Faserkunststoffverbunde und die Modellierung der kinematischen Kopplung eine entscheidende Rolle. Auf die Auswirkung der Modellierung der kinematischen Kopplung wird näher in Kapitel 2.4 eingegangen.

Ein wichtiger Punkt ist die korrekte Umsetzung der anisotropen Werkstoffeigenschaften der langfaser-verstärkten Kunststoffe in ein Materialmodell. Das Materialmodell muss dabei den Laminataufbau, Werkstoffgesetze, -verhalten und -kennwerte abbilden, [10]. Für die bei den Streben verwendeten Faserkunststoffverbunde ohne Sandwichelemente, wie Waben- oder Schaumkerne, können bestehende Modellierungsverfahren der FEM-Software HyperWorks genutzt werden. Die Werkstoffdaten der einzelnen Komponenten werden aus Datenblättern abgeleitet und in entsprechenden Software Tools, z.B. unter Ausnutzung von Mischregeln, in Kennwertwerte für den vollständigen Laminataufbau überführt. Diese fließen in die FEM-Modellierung ein. Die weiterhin relevanten Schnittstellen, wie z.B. zwischen metallischen Frästeilen und Glasfaser-Hohlprofilen, werden separat betrachtet und berechnet.

2.4. Leichtbaupotential durch genauere Modellierung in einer Mehrkörpersimulation

Die im vorliegenden Beispiel durchgeführte Auslegung mit Hilfe von FEM basierte im ersten Schritt auf einer CAD-System-nahen FEM-Simulation für qualitative Aussagen zur Worst-Case-Kombination von Lastfall/Geometrie und kurze Iterationsschleifen bei einer ersten Grobauslegung.

Wenn auch für eine qualitative Abschätzung zur Identifikation der Worst-Case Kombinationen ausreichend, so ergibt sich zur detaillierten Auslegung und dem abschließenden Nachweis die Notwendigkeit von umfangreicheren Modellierungsmöglichkeiten und Lösungsalgorithmen. Denn die Streben/Hohlprofile sind in der Realität zueinander drehbar (oben) und in den Füßen (unten) drehbar gelagert. Diese besondere kinematische Kopplung der Teile gilt es in der Modellierung umzusetzen.

So wurden die Schnittstellen an den hier als Bolzen dargestellten Schrauben zwar auch schon in der Grobauslegung als eine in einem rotatorischen Freiheitsgrad freie Verbindung modelliert, allerdings kann der Solvers der in diesem Fall verwendeten CAD-System-nahen FEM Software keine Lösung herbeiführen. In der Folge setzt der Solver die Schnittstelle automatisch fest, um so eine Lösung herbeizuführen. Das Ergebnis ist eine unrealistische Spannungsverteilung im eigentlich ausschließlich geradlinig Zug-/Druck-belasteten Profil und dem zugehörigen Verbindungselement (Bild 17).

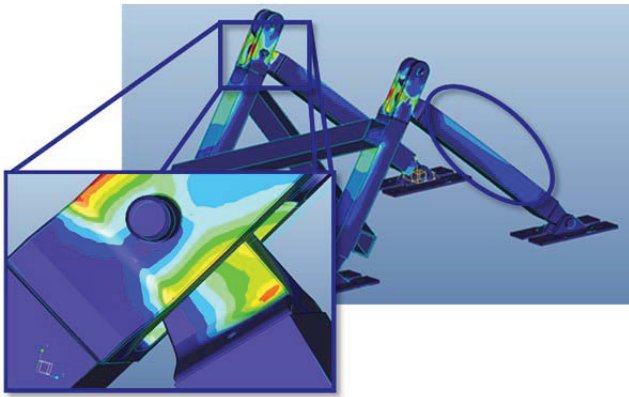


Bild 17: Unzutreffende Spannungsprognose bei drehbar gelagerten Verbindungselementen mit zentraler Krafteinleitung.

Die detaillierte Auslegung der zuvor identifizierten kritischen Worst-Case Kombination von Lastfall/Geometrie wurde in der FEM-Software HyperWorks durchgeführt. Wird hierbei die kinematische Kopplung in einem verformbaren Mehrkörpersystem modelliert, ergeben sich plausible Ergebnisse, wie beispielsweise die Zugspannungen in den Faserkunststoffverbunden in Bild 18 im Vergleich zu Bild 17 rechts. Da die FKV's mit ihrem anisotropen Verhalten in einer schichtweisen und richtungsabhängigen Materialmodellierung abgebildet wurden, können nun auch präzisere Aussagen zum Materialverhalten getroffen werden.



Bild 18: Realistische GFK-Zugspannungen bei Modellierung der kinematischen Kopplung des Mehrkörpersystems.

Durch die realistischere Prognose bei detaillierter Modellierung von anisotropen Materialeigenschaften und der kinematischen Kopplung als Mehrkörpersystem kann einem unvorhergesehenen Versagen in abschließenden Tests vorgebeugt werden und weiteres Leichtbaupotential bei der Auslegung, wie in 1.1 beschrieben, erschlossen werden. So kann beispielsweise in Bild 18 in der linken Strebe die in der Realität nur sehr geringe Druckbeanspruchung beobachtet und in der weiteren Entwicklung berücksichtigt werden. Dies ist bei einer Simulation ohne kinematischen Kopplungen wie in Bild 17 nicht möglich. Auch eine auf Leichtbau ausgerichtete Dimensionierung der Verbindungselemente aus Aluminium ist ohne exakte Spannungsprognosen nicht möglich.

2.5. Eingliederung in eine Gesamtmodulbauweise

In Kombination mit dem in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebenen Modulansatz ergibt sich eine weitreichende Flexibilität für Kabinenmonumente, wie Galleys oder Stowages. Durch eine Modulbauweise mit standardisierten internen Schnittstellen kann herstellerseitig die Funktionalität des Produktes (Galley oder Stowage) zusammen mit dem Kunden vorkonfiguriert werden. Im Flugzeug sorgt die hier präsentierte Anbindungs-Schnittstelle vom Monument zur Kabinenstruktur für Flexibilität bei der Positionierung. Bei Rekonfigurationen der Kabine können so einerseits die Funktionen des Monumentes angepasst werden, andererseits bietet dessen flexible Positionierbarkeit aber auch zusätzliche Freiheit bei der Änderung des Kabinenlayouts durch die neue Anbindung.

2.6. Fertigung

Zur Validierung der Modellierungsergebnisse und für weitere Untersuchungen zu verbleibendem Optimierungspotential der Modelle sollen vollwertige Prototypen unter möglichst realitätsnahen Worst-Case-Szenarien geprüft werden. Denn die Fertigung beeinflusst die Möglichkeiten des System-, Material- und Strukturleichtbaus maßgeblich, wie in Bild 1 dargestellt. Für die Verbindungselemente aus einer hochfesten Aluminiumlegierung mit entsprechender Wärmehandhabung existieren genormte Fertigungs- und Zertifizierungsprozesse.

Erheblich weniger standardisiert sind die quadratischen Hohlprofile aus glasfaserverstärkten Kunststoffen für die Streben. Eine Standardisierung speziell für den vorgestellten Anwendungsfall kann damit erst nach Definition geeigneter Streben mit Materialaufbau, Fertigung und Geometrie erfolgen.

Bei der Konzeption wurde versucht, grundsätzlich frei am Markt verfügbare Profile zu verwenden, um so auf einen gewissen Marktstandard zurückgreifen zu können und Kostenvorteile durch Losgrößeneffekte in einer späteren Anwendung zu ermöglichen. Hierbei stellte sich allerdings heraus, dass die in geringen Mengen frei ab Lager verfügbaren Produkte (für eine Prototypenfertigung) so stark kostenoptimiert gefertigt wurden, dass die Festigkeitseigenschaften weit hinter dem Möglichen zurückblieben und damit den Leichtbau-Gedanken zu stark unterliefen. Profile aus flugzeugzugelassenem, hochfestem Harz bei hohem Faservolumenanteil sind von den Anbietern fertigbar, werden allerdings erst auftragsbezogen in größeren Abnahmemengen gefertigt und sind damit für eine Prototypenfertigung nicht verfügbar.

Dementsprechend wurden die Profile der Prototypen selbst gefertigt. Dies hat den Vorteil, dass verschiedene Aufbauten der Verstärkungslagen und unterschiedliche Fertigungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung geprüft werden können. Der Lagenaufbau und andere Konstruktionsparameter der faserverstärkten Kunststoffe konnten auf Basis der detaillierten Modellierung hinsichtlich ihres Festigkeitsverhaltens bei minimalem Gewicht optimiert werden.

So wurden grundsätzlich die Fertigungsverfahren der Infusion und das Handlaminieren mit einer Aushärtung unter Vakuum verfolgt. Beim Handlaminieren werden

sukzessive Fasern und Harz aufgebracht, wobei auf eine ausreichende Durchtränkung aller Faserschichten zu achten ist.

Beim Infusions- oder auch Harzinjektionsverfahren gibt es viele verschiedene Prozessvarianten, durchgeführt wurden Versuche mit dem Vakuuminjektionsverfahren. Hierbei wird der trockene Faseraufbau in einem Vakuumaufbau eingeschlossen und durch Anlegen des Vakuums das Harz durch definierte Einlassstellen zugeführt. Da der maximale Druckunterschied $\leq 1\text{ bar}$ ist, sind dem Fließweg und damit auch der Bauteilgröße Grenzen gesetzt. [11]

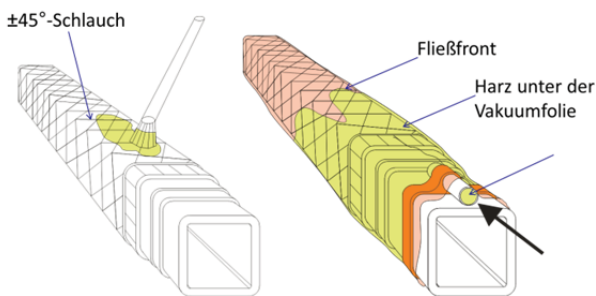


Bild 19: Handlaminieren (links) und Infusions-Fertigung (rechts) der Hohlprofile.

Die Fertigungsverfahren der Hohlprofile sind in Bild 19 schematisch dargestellt. Der Aufbau der Lagen von Verstärkungsfasern ist in einigen Fällen so gestaltet, dass bei Bedarf auch auf das in industriellem Umfeld wegen des preislichen Vorteils häufig verwendeten Pultrusionsverfahren gewechselt werden kann. Der Lagenaufbau entspricht in diesen Fällen dem Ergebnis, welches auch mit Pultrusion erzielt werden kann. Die Profile weisen einen hohen Anteil an unidirektionalen Fasern in Längsrichtung auf mit einigen wenigen äußeren Lagen von Fasern in einem Winkel von ca. $\pm 45^\circ$ um so einen besseren Zusammenhalt, insbesondere unter Biegebelastung, zu gewährleisten.

3. AUSBLICK

Der Projektrahmen sieht eine weitere Untersuchung und Validierung der vorgestellten Entwicklungen und Erkenntnisse vor. Darüber hinaus sind auch weitere Forschungsarbeiten diesbezüglich geplant. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

3.1. Testen des Upper Attachments

Die in der Modellierung und Auslegung getroffenen Annahmen sollen in einem ganzheitlichen Ansatz in abschließenden Tests validiert werden.

Die Tests werden am Institut PKT mit den Erfahrungen aus vorangehenden Versuchen, wie z.B. in [12] beschrieben, durchgeführt und umfassen zwei wesentliche Kernbereiche:

Zum einen soll die Gesamtfestigkeit bestimmt werden. Hierdurch können auslegungsrelevante Annahmen bei der Modellierung für die Simulationen hinsichtlich der Festigkeitsprognose abgesichert werden. Die Versuche werden nicht bei etwaigem Erreichen der Sollfestigkeit abgebrochen, sondern bis zum Bruch fortgeführt, um so bei Überschreiten der Sollfestigkeit das dann vorhandene Leichtbau-Potential zu benennen und mit der Simulation vergleichen zu können.

Zum Anderen soll die Modellierung der kinematischen Kopplung zwischen den einzelnen Elementen in den Drehgelenken überprüft werden, da hier die FEM-Simulation für zuverlässige Ergebnisse durch geeignete Modellierungselemente für Mehrkörper-Systeme erweitert werden muss. Dazu sollen ausgewählte Geometrien mit den entsprechenden kritischen Lastpfaden auf einem Hydropulser-Prüfstand mit universellem Spannungsfeld geprüft werden. Die am Institut PKT bestehende Prüftechnik ist für universelle Tests mit hohen Kräften bis 120kN ausgelegt. Die Tests können mit statischer und dynamischer Belastung bis ca. 30Hz durchgeführt werden. Weiterhin können durch Verwendung zweier Zylinder mit eigener Präzisionsregelung auch zwei-achsige Belastungssituation erzeugt werden.

Technische Daten der neuen Hydropulser-Anlage

Kraft	F	=	120	kN
Verfahrweg	s	=	300	Mm
Geschwindigkeit	$v_{\max}$	=	1,3	m/s
Arbeitsfrequenz	$f_{\max}$	=	40	Hz
Betriebsdruck	$p_{\max}$	=	280	Bar
Druckölversorgung	$Q_{\max}$	=	250	l/min
Spannungsfeldgröße			4m x 4m	

3.2. Zukünftige Tests für weitere Leichtbau-Optimierungen

Grundsätzlich werden in den Luftfahrtregularien EASA CS25 [8] und FAA FAR 25 [7] maximale Beschleunigungen für Kabineninterieur in Simulationen extremer Flugmanöver und Notlandungen angegeben. Die aus diesen Beschleunigungen resultierenden Trägheitslasten müssen von den jeweiligen Befestigungen des Kabineninterieurs ertragen werden. Dazu gibt der Flugzeughersteller ggf. eigene Spezifikationen vor. Diese geben typischerweise maximale Einzellasten in X-Richtung, der Längsrichtung des Flugzeugs, ebenso vor wie kombinierte Lastfälle. Ein Ausschnitt dieser Lastfälle ist in Bild 9 dargestellt. Diese Lastkollektive beinhalten Lasten in X-Richtung und ggf. in Y-Richtung, wenn diese durch die jeweilige Anbindung übertragen werden können. In einigen Fällen entstehen geringe Kräfte in vertikaler Richtung, welche aus einem Winkelversatz der Anbindung resultieren können. Mit einem Prüfaufbau für zwei-achsige Belastungen, wie unter 3.1 beschrieben, lassen sich grundsätzlich die vorgeschriebenen Lastkollektive auf die Prüflinge aufbringen. Ein Winkelversatz, kann, wenn notwendig, konstruktiv hinzugefügt werden.

Um allerdings über die reinen Zertifizierungsvorschriften hinaus konsequenten Leichtbau realisieren zu können, sind Tests mit allen sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und 3 rotatorische) notwendig. Dadurch kann zum einen die Sicherheit auch unter komplexeren Lastkollektiven gewährleistet werden, zum anderen aber auch unnötige Überdimensionierungen erkannt werden. Diese können in einer folgenden Leichtbau-Optimierung zu einer Gewichtsoptimierung genutzt werden.

Die Vorteile der höheren Sicherheit und der Identifizierung weiteren Leichtbau-Potentials bei Tests in allen Freiheitsgraden können allerdings noch besser genutzt werden, wenn statt statischer Tests dynamische Belastungen aufgebracht werden. Tests mit quasi-statischen Äquivalenten einer dynamischen Trägheitslast sind heute in vielen Fällen bei der Zertifizierung üblich und

berufen sich üblicherweise auf die RTCA DO-160 [13], Chapter 7. Hierbei sind allerdings zur Wahrung der Sicherheit hohe Sicherheitszuschläge notwendig. Diese bilden die Grundlage für weitere Leichtbau-Optimierungen, wenn realitätsnähere Umgebungsbedingungen in Simulation und Test realisiert werden können.

Die beschriebenen Prüfumgebungen mit dynamischen Belastungen in allen sechs Freiheitsgraden müssen für sämtliche Kabinenmonumente erzeugt werden können. Dies schließt beladene Galleys mit einem Gewicht von ca. 1000kg ein. Da diese geforderten Prüfbedingungen nirgends in der notwendigen Form vorzufinden sind, diese aber grundsätzlich notwendig sind, um Leichtbau sowohl grundlagenorientiert wie auch anwendungsbezogen für große Prüfkörper unter mehrachsiger dynamischer Belastung durchzuführen, ist ein neuer Prüfstand² für diese Tests im Aufbau. Der entsprechende Prüfstand wurde von der DFG finanziert und befindet sich derzeit in der letzten Bauphase. Der Prüfstand basiert auf einem Hexapod-Prinzip, siehe Bild 20. Dabei stellen sechs Hydraulikzylinder, welche jeweils paarweise zu einem Fußpunkt zusammengefasst werden, als Parallelkinematik die notwendige Beweglichkeit in allen sechs Freiheitsgraden her. Es können dynamische Belastungen bis 6g und 30Hz bei einer Nutzlast von 1250kg realisiert werden.

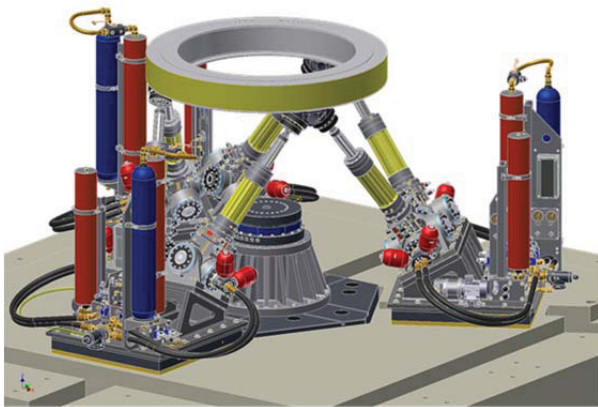


Bild 20: Von der DFG geförderter Hexapod-Prüfstand an der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Die technischen Möglichkeiten des neuen Hexapod-Prüfstandes, für den die Technische Universität Hamburg-Harburg eigens ein eigenes Prüffeld errichtet hat, erlauben umfangreiche statische und dynamische Versuche mit Belastungen in allen sechs Freiheitsgraden. Es sind derzeit Projekte geplant und beantragt, welche sich sowohl mit Grundlagen im Bereich Leichtbau als auch mit Anwendungen, z.B. aus dem Kabineninterieur, beschäftigen. So können auch zukünftig innovative Lösungen für Kabinenmonumente entwickelt und hinsichtlich konsequenten Leichtbaus optimiert werden. Hierbei dienen die grundsätzlichen Erkenntnisse aus Versuchen auf dem Hydropulser und dem Hexapod, z.B. zur Modellierung von Faserkunststoffverbunden in Sandwichbauweise für simulationsgestützte Prognosen in

der Auslegung, insbesondere unter den Randbedingungen der Luftfahrt, als Basis.

Technische Daten der neuen Hexapod-Anlage

Kräfte bis zu	F	=	500	kN
Geschwindigkeiten bis zu	v	=	1	m/s
Drehmomente bis zu	T	=	40	kNm
Arbeitsfrequenz bis	f	=	30	Hz
Beschleunigungen bis zu	a	=	6	m/s ²
Verfahrwege (kombiniert)	s	=	+/-150	mm
Winkel bis zu	α	=	+/- 5°	
Nutzlast (dynamisch)	m	=	1250	kg

4. LITERATUR

- [1] T. Gumpinger, H. Jonas, B. Plaumann, and D. Krause, "visualization concept for supporting module lightweight design," in Accepted paper to: International Conference on Engineering Design - ICED11, 2011.
- [2] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin: Springer Verlag, 2005.
- [3] D. Krause and S. Eilmus, "Methodical Support for the Development of Modular Product Families," in The Future of Design Methodology, H. Birkhofer, Ed. London: Springer-Verlag, 2011, pp. 35-45.
- [4] C. Blees, T. Kipp, G. Beckmann, and D. Krause, "Development of Modular Product Families: Integration of Design for Variety and Modularization," in Norddesign, 2010.
- [5] D. Jonas, H.; Gumpinger, T.; Krause, "FlexGalley - Innovative Approach for a Modular Design of an Aircraft Galley," in 2nd CEAS European Air and Space Conference, 2009.
- [6] C. Blees, H. Jonas, and D. Krause, "perspective-based development of modular product architectures," in International Conference on Engineering Design – ICED09, 2009, vol. 2, August.
- [7] Federal Aviation Administration (FAA), "Federal Aviation Regulations (FAR), Title 14: Aeronautics and Space, Part 25 - Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes." 2011.
- [8] European Aviation Safety Agency (EASA), "Certification Specification for Large Aeroplanes CS-25." amendment 9, 2010.
- [9] D. Krause, H. Jonas, and T. Gumpinger, "Halterung für Inneneinrichtungskomponenten in Flugzeugkabinen." DPMA, zum Patent angemeldet, 2010.
- [10] K.-J. Bathe, Finite-Elemente-Methoden. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [11] M. Neitzel and P. Mitschang, Handbuch Verbundwerkstoffe. München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [12] H. Jonas, O. Rasmussen, T. Gumpinger, and D. Krause, "Efficient Testing support for Methodical Product Development of Aircraft Interior components," in Supply on the wings, 2010.
- [13] RTCA Incorporated, "DO-160F Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment." 2007.

² Von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die interdisziplinäre Forschergruppe des Vorhabens setzt sich zusammen aus dem Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (Prof. D. Krause, Koordination), dem Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe (Prof. K. Schulte) und dem Institut für Zuverlässigkeitstechnik (Prof. U. Weltin).