

NEUE ANSÄTZE ZUR ENTWICKLUNG INNOVATIVER UND NACHHALTIGER BAUWEISEN IN DER FLUGZEUGKABINE

L. Schwan, M. Hanna, T. S. Hartwich, E. Heyden, P. Hüttich, O. Sankowski, J. Schwenke, S. Wehrend, D. Krause, Institut für Produktentwicklung und Produktentwicklung, Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Der Kostendruck und der steigende Bedarf nach Nachhaltigkeit in der Luftfahrt stellen besondere Anforderungen an die Flugzeugkabine und deren Bauweise dar. In diesem Beitrag werden daher neue Ansätze vorgestellt, um diesen Aspekten zu begegnen und innovative und nachhaltige Bauweisen in der Flugzeugkabine zu entwickeln. Weiterhin wird das Potenzial aufgezeigt, welches sich durch die gleichzeitige Betrachtung unterschiedlicher Bereiche und die Umsetzung einer hybriden Bauweise ergibt.

Keywords

Flugzeugkabine; Bauweisen; Modularisierung; Leichtbau; Nachhaltigkeit

1. EINLEITUNG

Die Entwicklung von Flugzeugkabinenmonumenten, wie Flugzeugbordküchen (Galleys), Flugzeugbordtoiletten (Lavatories) oder Gepäckauffbewahrungsfächern (Overhead Bins), befindet sich im Umbruch [1]. So ergeben sich immer neue Herausforderungen und Anforderungen an die Kabine, welche innovative Lösungen für deren Bauweise erfordern [2]. Als Herausforderungen in der Kabinenentwicklung sind beispielsweise die hohe Varianz aufgrund individueller Kundenwünsche durch die Airlines, Effizienzsteigerungen, Kostendruck sowie der steigende Bedarf nach Nachhaltigkeit in der Luftfahrt zu nennen [2]. Darüber hinaus müssen bei der Flugzeugkabinenentwicklung auch die speziellen Zertifizierungsvorschriften und Auslegungsrichtlinien aus der Luftfahrt berücksichtigt werden [3]. Um diesen umfassenden Herausforderungen begegnen zu können, benötigt es neben neuen Ansätzen zur Entwicklung innovativer Flugzeugkabinenkonzepte und -bauweisen, welche einzelne Herausforderungen lösen, auch Ansätze, um Synergien aus den unterschiedlichen Teilbereichen nutzen zu können, um ein Kabinenbauweisenkonzept zu entwickeln, welche möglichst alle Anforderungen erfüllt [1; 2]. Entsprechende Entwicklungsansätze werden in diesem Beitrag vorgestellt.

In Kapitel 2 werden dafür zunächst die Herausforderungen bei der Entwicklung der Flugzeugkabinenbauweise in den drei relevanten Bereichen der Modularisierung, des Leichtbaus sowie bei den entwicklungsbegleitenden Auslegungs- und Testprozessen der Bauweisen näher beschrieben. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 neue Ansätze zur Entwicklung der Flugzeugkabinenbauweise in den dargestellten Bereichen vorgestellt, welche im Rahmen verschiedener Luftfahrtforschungsprojekte und aufbauend auf der langjährigen Luftfahrtexpertise des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) erarbeiteten wurden. Hierauf aufbauend wird in Kapitel 4 gezeigt, wie durch die gemeinsame Betrachtung der unterschiedlichen

Bereiche synergetische Effekte genutzt werden können, um eine digital und effizient ausgelegte hybride Bauweise der Flugzeugkabine, bei der unterschiedliche Bauweisen und Materialien eingesetzt werden, umzusetzen. Neben ersten integrativen Ansätzen wird auch aufgezeigt, wie Nachhaltigkeitsaspekte zukünftig noch stärker in die Entwicklung von Bauweisen miteinbezogen werden können. Abschließend erfolgt in Kapitel 5 eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

2. HERAUSFORDERUNGEN BEI DER ENTWICKLUNG DER FLUGZEUG-KABINENBAUWEISE

Während Kapitel 2.1 Herausforderung bei der Entwicklung modularer Bauweisen beschreibt, werden in Kapitel 2.2 Herausforderungen bei der Entwicklung von Leichtbau-Bauweisen und in Kapitel 2.3 bei der Erarbeitung entwicklungsbegleitender Auslegungs- und Testprozesse beschrieben.

2.1. Modularisierung

Individuelle Kundenwünsche führen im Bereich der Flugzeugkabinenentwicklung zu einer Vielzahl an Produktvarianten, mit denen eine hohe Produkt- und Prozesskomplexität einhergeht. Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien sind ideal, um individuelle Kundenanforderungen der Airlines mit einer möglichst geringen Anzahl an internen varianten Komponenten zu erfüllen. Ein Monument mit hohem Bedarf zur Modularisierung stellt die Galley dar, da sie ein großes und schweres Monument mit vielen kundenindividuellen Anforderungen darstellt. Die Fluggesellschaft ist ein wesentlicher Stakeholder, welcher verschiedene Anforderung an diese stellt. Beispielsweise sollen in der Galley Mahlzeiten erwärmt und Lebensmittel verstaut sowie Kaffee gekocht werden können. Weiterhin variiert die Anzahl der Öfen, Stauraumboxen und Kaffeemaschinen. Je nach Airline und Flugroute werden die Galleys folglich unterschiedlich ausgestattet. Diese Kundenwünsche führen allerdings zu einer hohen Vielfalt an Komponenten

und daraus resultierenden komplexen Prozessen, nicht nur für die Monumente, sondern auch für die Anbindung an die Primärstruktur des Flugzeuges. Um die Varianz innerhalb einer Produktfamilie abzudecken und gleichzeitig die interne Varianz zu reduzieren, können unterschiedliche modulare Konzepte der Monumente entwickelt werden.

Der Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien kann hierbei insbesondere durch die beiden Methodenbausteine der variantengerechten Produktgestaltung und der Lebensphasenmodularisierung unterstützend herangezogen werden, um die modularen Produktfamilien der Monumente zu entwickeln [1]. Der Integrierte PKT-Ansatz enthält dabei unterschiedliche Visualisierungswerkzeuge, um die Produktentwicklung zu unterstützen. In der variantengerechten Produktgestaltung wird neben der externen auch die interne Vielfalt mittels des Module Interface Graphs (MIG) aufgenommen, welcher alle Komponenten einer Produktfamilie mit ihren Formen, Positionen, Varianz und Flüssen darstellt. Anschließend wird die Produktstruktur dahingehend umgestaltet, dass sie einem variantengerechten Ideal entspricht. Die anschließende Lebensphasenmodularisierung unterstützt bei der Entwicklung einer harmonisierten modularen Produktstruktur für alle relevanten Lebensphasen. In zahlreichen Luftfahrtforschungsprojekten konnten die beiden Methodenbausteine der variantengerechten Produktgestaltung und der Lebensphasenmodularisierung angewendet werden, um modulare Produktfamilien für Flugzeugkabinenmonumente zu entwickeln. Insbesondere für die Flugzeuggalley konnten so unterschiedliche modulare und variantengerechte Konzepte entwickelt werden, wie dies in den MIGs in BILD 1 dargestellt ist.

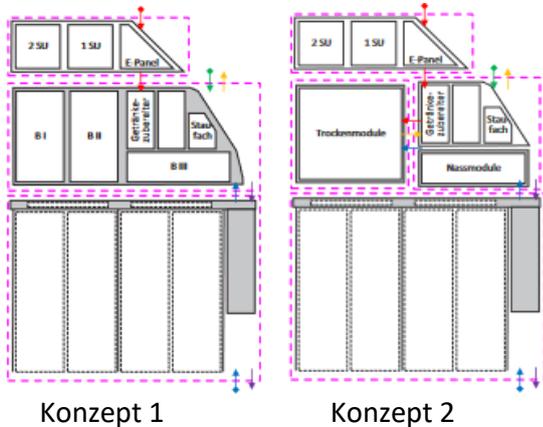


BILD 1. Zwei repräsentative modulare Konzepte für Flugzeuggalleys dargestellt im MIG, in Anlehnung an [4]

Im ersten modularen Konzept wird die bestehende integrale Produktstruktur horizontal in drei Module geteilt, wobei das obere Modul standardisiert und für die Standard Units und E-Panel vorgesehen ist. Das untere Modul ist ebenfalls größtenteils standardisiert und bietet Platz für die Trolleys. Im mittleren Modul kann der Kunde zwischen Öfen, Getränkezubereitern und zusätzlichen Staufächern wählen. Im zweiten Konzept wird die Galley in vier Module aufgeteilt. Im Gegensatz zum ersten Konzept sind im mittleren Bereich 2 Module vorgesehen, eins für den Trocken- eins für den Nassbereich. [1; 4]

Zwar konnte der Integrierte PKT-Ansatz bereits erfolgreich für die Entwicklung modularer Kabinenmonumente angewendet werden, Ansätze bei welchen auch die Anknüpfung an die Flugzeugschale berücksichtigt wird, sind bisher nicht betrachtet worden.

2.2. Leichtbau

Im Luftfahrtsektor hängen der Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen, wie CO₂, direkt von der bewegten Masse ab. Deshalb ist ein Hauptziel die Masse der Flugzeugkabine zu minimieren. Aufgrund ihrer guten gewichtsspezifischen Materialeigenschaften werden Sandwichstrukturen häufig für Kabinenmonumente in kommerziellen Passagierflugzeugen eingesetzt [5].

Sie bestehen aus Deckschichten, die primär die in der Ebene wirkenden Zug- und Druckkräfte aufnehmen, und einem Wabenkern, der das Flächenträgheitsmoment erhöht und Scherkräfte aufnimmt [6]. Um lokale Kräfte in die Sandwichstruktur einzuleiten, werden lokale Verstärkungen in Form von Sandwichverbindungselementen, wie z.B. Inserts oder Hartgewebeblöcken, verwendet [7; 8]. Diese werden insbesondere benötigt, um die Monumente über Anbauteile mit der Primärstruktur des Flugzeugs zu verbinden, um die einzelnen Paneele miteinander zu verbinden oder um verschiedene Anbauteile zu befestigen. Allerdings erweist sich die Lasteinleitung in diese Sandwichstrukturen oft als kritisch, da die genaue Auslegung der Lasteinleitungspunkte entscheidend für die Sicherheit von Flugzeugkabinenbauteilen ist [9].

Fehlende Testaufbauten, hohe Sicherheitsfaktoren in der Auslegung und eine nicht lastpfadgerechte Gestaltung führen zu Überdimensionierung der Bauteile und konterkarieren den angestrebten Leichtbau [10]. Aufgrund der hohen Anzahl von Lasteinleitungspunkten in Sandwichstrukturen, insbesondere in der Flugzeugkabine, besteht ein hohes Potenzial zur gezielten Gewichtsreduktion.

Weiterhin führen auftretende Vibrationsbelastungen, u.a. resultierend aus Turbinenschäden, Bodenmanövern und Turbulenzen, zu hohen Lasten auf die Struktur [11]. Das resultierende Schwingungsverhalten ist ein entscheidendes Auslegungskriterium in der Entwicklung von Kabinenelementen [12]. Aktuell werden bei den Tests starre Anbindungselemente der Testobjekte aus dem Kabineninterieur an die Rumpfstruktur verwendet [13]. Auf diese Weise lässt sich ein virtuelles Modell mittels FEM, welches ebenfalls starre Randbedingung aufweist, sehr gut auf das physikalische Modell übertragen [14]. Die Eigenschaften der Schnittstellen haben einen entscheidenden Einfluss auf das Schwingverhalten der angebotenen Struktur [15]. Aus diesem Einfluss der Schnittstellen lassen sich zwei Herausforderungen im Bereich der dynamischen Untersuchung von Kabinenelementen ableiten. Zum einen ist die Übertragbarkeit des Schwingungsverhaltens der Kabinenelemente auf die Realität als kritisch zu beurteilen [14] und zum anderen kann dieser Einfluss auch so angepasst werden, dass eine Schwingungsreduzierung von Kabinenelementen erreicht wird [16].

2.3. Auslegungs- und Testprozesse

Neben den dargelegten Herausforderungen in den Bereichen der Modularisierung und des Leichtbaus müssen Bauweisen auch ausgelegt und getestet werden. Dabei können Kabinenmonumente und deren Komponenten in unterschiedliche strukturelle Detailgrade aufgeteilt werden, auf welchen Tests bzw. eine Auslegung durchgeführt werden muss [14; 17]. Diese Detaillierungsebenen sind in der, in BILD 2 dargestellten, Produkt-Komponenten-Testpyramide (PKT-Pyramide) in generischer Form dargestellt, wobei zwischen der Materialebene, der Struktur- und Komponentenebene sowie der Produktebene unterschieden wird. Die Detaillierungsebenen hängen von der jeweils betrachteten Zielstruktur ab und können entsprechend erweitert bzw. angepasst werden. Neben den strukturellen Detaillierungsebenen sind in der PKT-Pyramide mit der realen Anwendung, dem physischen Testmodell und dem virtuellen Testmodell auch drei unterschiedliche Sichtweisen aufgeführt.

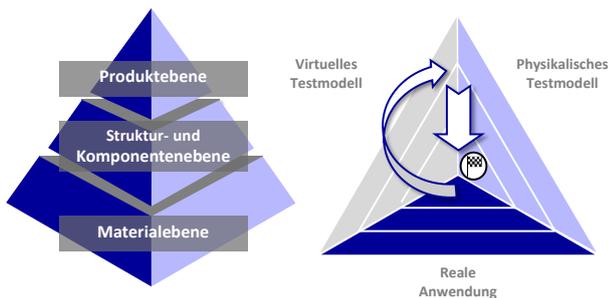


BILD 2. Darstellung der Produkt-Komponenten-Testpyramide, in Anlehnung an [17]

Zur Zertifizierung, aber auch bei der Erprobung neuer Gestaltungen und Bauweisen sind eine Vielzahl physischer Tests erforderlich, welche kosten- und zeitintensiv und durch den hohen Ressourcenverbrauch beim Testen, beispielsweise durch die Fertigung von Prüflingen, nicht nachhaltig sind. Insbesondere im Rahmen der Gestaltungsfindung müssen mehrere Iterationen beim Testen durchlaufen werden, was diese Problematik verschärft. Um den hohen Testaufwand bei der Auslegung von Bauweisen zu reduzieren, können virtuelle Testverfahren aufbauend auf der Finite-Elemente Methode (FEM) eingesetzt werden. Die virtuellen Testmodelle werden dabei nach der PKT-Pyramide hierarchisch aufgebaut und auf den jeweiligen strukturellen Detaillierungsebenen an physischen Tests validiert. Seemann [9] zeigt einen Ansatz, um Verbindungselemente in Sandwichstrukturen effizient auszulegen und den physischen Testaufwand im Gestaltungsprozess somit zu reduzieren. Dabei verwendet er detaillierte Meso-Modelle, um das progressive Schädigungsverhalten der Struktur vorherzusagen. Eine Anwendung und Übertragbarkeit dieser Modelle auf Produktebene, auf welcher aktuell stark vereinfachte Modelle in der Auslegung verwendet werden, ist aufgrund des hohen Modellierungsaufwands und hoher Berechnungszeiten nicht möglich. Hierdurch ist eine detailgenaue Auslegung auf höheren strukturellen Detaillierungsebenen nicht gegeben und entsprechende Ansätze zur Erweiterung der detaillierten virtuellen Testmodelle fehlen. Weitere Herausforderungen beim Testen sind die Abbildung der Testrandbedingungen an den Systemgrenzen sowie die Lasteinleitung, welche möglichst den Bedingungen aus der realen Anwendung entsprechen sollten [17]. Hierbei besteht jedoch die

Problematik, dass die Randbedingungen in den Tests oft zu stark von der realen Anwendung abstrahiert werden, um den physischen Testaufwand gering zu halten. Beispielfhaft werden beim Test von Kabinenmonumenten, wie beispielsweise Bordküchen (Galleys), nur lasttragende Elemente (in der Regel der Rohbau) getestet und die Last wird über Sperrholzplatten, sogenannte Loadpads, flächig in die Struktur eingebracht, was nicht der tatsächlichen Lasteinleitung in die Struktur über Insert entspricht. Dadurch, dass die Tests aufgrund dessen nur unzureichend der realen Anwendung entsprechen, werden teilweise hohe Sicherheitsfaktoren aufgeschlagen, was dem Ziel des Leichtbaus entgegenwirkt und die Entwicklung leichter Bauweisen hemmt.

Eine weitere Einflussgröße bei der Auslegung von Kabinenkomponenten sind die Art und Dauer auftretender Umgebungseinflüsse, wobei zahlreiche Lasten Einfluss auf die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Bauteilen nehmen. Mechanische und hygrothermische Einflüsse zählen dabei zu den bekanntesten. Sowohl entwicklungsbegleitend als auch in der Zulassung sicherheitsrelevanter Komponenten müssen Prüfnachweise zur Sicherstellung der Funktion erbracht werden. Trotz Kenntnis zu Wechselwirkungen bei der Kombination finden industrieseitig Tests von Strukturkomponenten vorwiegend separat statt. Der Grund dafür liegt in der Notwendigkeit spezieller Prüfstände und dem durch Wechselwirkungen beeinflussten Systemverhalten, welches bedingt durch die Sicherstellung realistischer Lastbeaufschlagung und Vermeidung von Überlasten Herausforderungen in der Planung, Umsetzung und Auswertung solcher Versuche mit sich bringt. Zwar bietet die Durchführung separierter Tests einige Vorteile und nicht alle Umgebungseinflüsse weisen Wechselwirkungen auf bzw. schließen sich sogar gegenseitig aus, in Untersuchungen im Bereich Leichtbaumaterialien wurde allerdings auf niedriger Komplexitätsebene bereits mehrfach nachgewiesen, dass die Überlagerungen bestimmter Einflüsse einen signifikanten Einfluss auf das Systemverhalten hat und sich nicht aus den isolierten Betrachtungen ableiten lässt.

Normseitig bieten sowohl die IEC 60068 bzw. DIN EN 60068, als auch die in der Luftfahrt bekannten Normen DO-160 und MIL-STD-810 nur Anhaltspunkte zum Testen kombinierter mechanischer und klimatischer Bedingungen, wobei ein linearer Zusammenhang der kombinierten Bedingungen vorausgesetzt wird. Lediglich im Bereich elektrischer und elektronischer Komponenten werden vermehrt kombinierte Tests der Umgebungseinflüsse gefordert. Unter den Aspekten möglicher Kosteneffizienz und der Realitätsnähe ist allerdings ebenfalls eine vertiefende Untersuchung zum überlagerten Testen mit Strukturkomponenten anzustreben. Dies eröffnet insbesondere die Möglichkeit, eine weitere Reduzierung der Sicherheitsfaktoren zu erreichen und führt zu einer besseren Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen.

3. NEUE ANSÄTZE ZUR ENTWICKLUNG VON FLUGZEUGKABINENBAUWEISEN

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Ansätze zur Entwicklung von Flugzeugkabinenbauweisen in den drei unterschiedlichen Bereichen vorgestellt.

3.1. Modularisierung

Neue Ansätze zur Entwicklung modularer Produktfamilien in der Luftfahrt gehen über die bisherige Betrachtung begrenzt auf einzelne Monumente hinaus. In den beiden Forschungsprojekten SeMoSys und ANKA verschiebt sich die Systemgrenze der zu optimierenden Produktstruktur, wobei sich durch eine ganzheitliche Betrachtung neue Potentiale hinsichtlich Produktentwicklung, Produktion und Montage ergeben.

Ein Ansatz, der über die isolierte Betrachtung und Entwicklung von modularen Kabinenmonumenten hinausgeht, wird im LuFo-Projekt SeMoSys verfolgt. Hier ist es das Ziel in einer Generationsentwicklung eine Synergie zwischen der Flugzeugschale, zugehörigen Strukturbauteilen und den Kabinenmonumenten zu erreichen. Unter Beteiligung des Flugzeugherstellers und den zugehörigen Kabinen- und Strukturausrüstern ist es möglich, eine modulare Struktur aufzubauen, welche die gewünschte kundenrelevante Varianz ohne die Systembegrenzung der Kabine erreicht. Es werden somit nicht nur Potentiale durch eine produktfamilienübergreifende Betrachtung von verschiedenen Kabinenmonumentfamilien erzielt, sondern auch durch eine produktübergreifende Betrachtung der Schale angestrebt. Dadurch entsteht sowohl weiteres Leichtbaupotential, als auch das Potential die Montageprozesse bei der Installation der Monumente zu verbessern. Im hinteren Bereich der Flugzeugkabine und der Außenstruktur vor dem rear pressure bulkhead werden repräsentativ Synergieeffekte der Flugzeugstrukturen, Schnittstellen und der Bordküche untersucht. Hier ist die Galley sowohl in ganzer (Loc V) als auch in Kombination mit einer Toilette (Loc IV) ausgeführt. Eine ganzheitliche Betrachtung des Bereiches ermöglicht es, auch lasttragende Strukturen im Bauvolumen der Galley vorzusehen, die sowohl Kräfte aus den Rumpfsegmenten der Flugzeugstruktur aufnehmen, als auch für die Montage der Substrukturmodule genutzt werden können (siehe BILD 3).

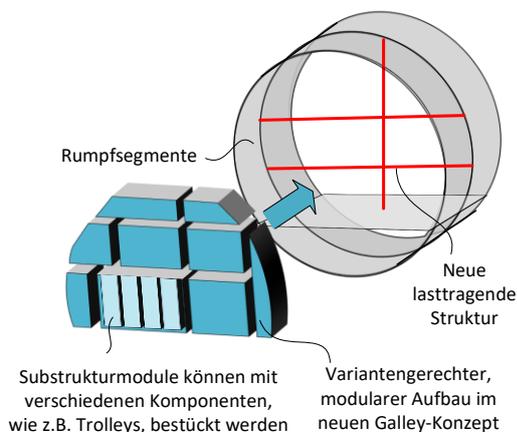


BILD 3. Konzeptionelle Darstellung der lasttragenden Struktur zwischen Flugzeugstruktur und hinterer Galley

Die einzelnen Substrukturmodule der Galley können dann wiederum mit verschiedenen Komponenten an unterschiedlichen Positionen bestückt werden, wie z.B. Trolleys, Öfen oder sonstigen Staufächern. Ihre Schnittstellen zur neuen lasttragenden Struktur sollten dabei möglichst standardisiert sein, während die Schnittstellen nach innen zu den verschiedenen Komponenten in varianter Form auf diese angepasst sein können. Die dafür geeignete Strategie ist somit eine Überdimensionierung zur lasttragenden Struktur, die die neue Plattform des Konzepts darstellt, sowie eine variantengerechte Gestaltung der inneren Substrukturmodule, um die vielfältigen Bestückungsoptionen gewichtsoptimiert umsetzen zu können. Die detaillierte Auslegung der neuen Strukturelemente sowie die zugehörige modulare Gestaltung der neuen Substrukturmodule der Galley steht dabei noch aus.

Im Forschungsprojekt ANKA wird für Großkabinenmodule neben der Ausgestaltung der modularen Produktstruktur einer Flugzeugkabine und deren Schnittstellen auch die Kostenabschätzung mit einbezogen. Dadurch können unterschiedliche Produktstrukturkonzepte hinsichtlich ihrer Komplexitätskosten bewertet und diese Kostenprognose verwendet werden, um eine kostenoptimierte Modulare Produktstruktur zu verwenden. Eine standardisierte Plattform in der Flugzeugkabine kann Kosten und Durchlaufzeit deutlich reduzieren und gleichzeitig die Schnittstelle für die vom Kunden geforderte Varianz liefern. Die Anbindungsmöglichkeiten der Modulkonzepte an die Struktur und der Gestaltungsmöglichkeiten der Schnittstellen stellen ebenfalls Bewertungskriterien für die Auswahl eines Konzeptes dar. [2]

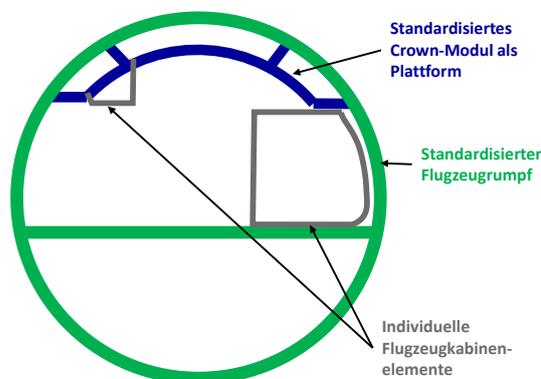


BILD 4. Konzeptionelle Darstellung des Crown Moduls als standardisierte Plattform

In BILD 4 ist das Konzept schematisch dargestellt. Das sogenannte Crown Module ist in blau dargestellt und dient als standardisierte Plattform. Dadurch ist der Rumpf unabhängig von der Konfiguration der Flugzeugkabine montiert. Durch die entsprechende Gestaltung der standardisierten Schnittstellen kann die Flugzeugkabine aber weiterhin individuell nach den Kundenanforderungen konfiguriert werden. Somit bleibt die externe Vielfalt hoch, die interne Vielfalt sowohl in der Kabine, als auch in der Flugzeugstruktur wird aber gesenkt und damit die Komplexitätskosten reduziert.

Beide hier vorgestellten Projekte adressieren einen verbesserten Produktentstehungsprozess hinsichtlich Kosten und Montageaufwand. Vorteile resultieren durch einen erweiterten Betrachtungsbereich, welcher die Flugzeugkabine, angrenzende Systemschnittstellen und die tragenden Strukturen berücksichtigt. Synergieeffekte können genutzt werden, um die hohen Komplexitätskosten in der Produktentstehung zu reduzieren und den Montageprozess zu vereinfachen.

3.2. Leichtbau

Neue Leichtbauansätze zur Entwicklung von Flugzeugkabinenbauweisen nutzen numerische Optimierungen, insbesondere die Topologieoptimierung, und neue Gestaltungsmöglichkeiten u.a. durch additive Fertigung (AM), um die lokale Lasteinleitung und Weiterleitung in Leichtbaustrukturen zu verbessern. Gerade in hochbelasteten Bereichen bietet die Minimierung von Schnittstellen und die lastpfadoptimierte Integration von lokalen Verstärkungen ein hohes Leichtbaupotential. Durch Ausnutzung der Designfreiheit innovativer Produktionsverfahren wie der Additiven Fertigung bietet sich die Chance, eine bestmögliche Materialausnutzung bei minimalem Gewicht zu erreichen.

Die mechanischen Eigenschaften von lokalen Kräfteinleitungspunkten in Sandwichstrukturen mit Wabenkern können durch neue Gestaltungskonzepte verbessert werden, die die Steifigkeitsdiskontinuität an der Schnittstelle zwischen Lasteinleitungspunkt und Kern reduzieren. Alternativ kann die komplette lastragende Struktur eines einzelnen Sandwichpanels oder gesamten Monumentes durch eine neue Bauweise ersetzt werden, die belastungsgerecht gestaltet ist. Durch die Substitution der Sandwichmaterialien kann der ökologische Fußabdruck durch die Verwendung recyclebarer Strukturen verringert werden.

Im Folgenden werden jeweils ein lokaler und ein globaler Leichtbauansatz beispielhaft präsentiert.

Das erste Beispiel ist eine Flugzeugtrennwand, an der zwei Flugbegleitersitze befestigt sind. Im Falle eines Absturzes oder bei Notlandbedingungen müssen enorme Lasten aufgenommen werden. Mithilfe additiver Fertigungsverfahren lässt sich eine lastpfadoptimierte Struktur einer Flugzeugkabinentrennwand realisieren. Bestehende additive Konzepte basierten bisher immer auf sogenannten Pulverbettverfahren. Durch die damit verbundenen Bauraumbegrenzungen mussten daher die Entwürfe in viele Teile partitioniert und über Verbinderelemente zusammengesetzt werden [18]. Dies beeinträchtigt die angestrebten Leichtbauziele. Um die Trennwand in einem Stück zu drucken, wird das Direct Energy Deposition (DED)-Verfahren verwendet. Ein Lasterschweißkopf ist mit einem Roboterarm gekoppelt, sodass ein besonders großer Bauraum erreicht wird [19]. Eine schematische Darstellung ist in BILD 5 gezeigt.

Herausforderungen stellen hingegen geringe Genauigkeiten, anisotrope Materialeigenschaften sowie die Notwendigkeit einer Grundplatte dar. Diese gilt es zu beherrschen.

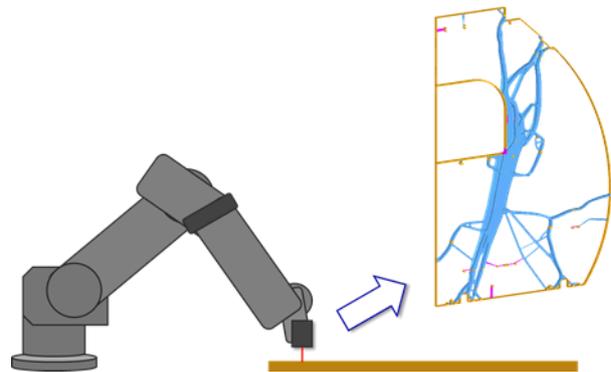


BILD 5. Schematische Darstellung der Fertigung einer DED-gedruckten Flugzeugkabinentrennwand

Der zweite Ansatz ist die lastpfadoptimierte Gestaltung von Lasteinleitungspunkten in Sandwichstrukturen. Durch numerische Optimierungen kann der Steifigkeitssprung an den Schnittstellen verringert und die lokale Einleitung der Lasten verbessert werden. Zur Umsetzung ist die Anwendung verschiedener Gestaltungskonzepte möglich, so kann beispielsweise eine gezielte Anpassung der eingebrachten Kernfüllmasse bzw. Pottingmasse erfolgen [20]. Ein weiteres Konzept ist die Nutzung der additiven Fertigung zur Herstellung lastpfadoptimierten Einsätze, um Inserts bzw. Hartgewebelöcke in Sandwichstrukturen zu ersetzen oder eine direkte Integration der Lasteinleitungspunktes in den additiv gefertigten Kern zu ermöglichen [21; 22].

Weiterführend ist die Kombination verschiedener Ansätze im Sinne einer modularen Hybridbauweise möglich, bei der die einzelnen Paneele je nach Art und Höhe der Belastung unterschiedlich gestaltet sind [23]. Hierauf wird ausführlich in Kapitel 4 eingegangen.

Neben der Auslegung mit statischen Äquivalenzlasten sind Kabinenelemente in Verkehrsflugzeugen auf Vibrationsbelastungen auszulegen. Kabinenstrukturen sind empfindlich gegenüber niederfrequenten Schwingungen, da die Strukturen aufgrund ihrer geringen Dicke im Vergleich zur ebenen Dimension eine geringe Biegesteifigkeit aufweisen [16]. Die Variation von Schnittstelleneigenschaften bietet die Möglichkeit das Schwingungsverhalten positiv zu beeinflussen. Einstellbare Schnittstellenelemente ermöglichen eine Variation des Schwingverhaltens und bieten damit das Potential der Abbildung unterschiedlicher Schwingungsreduzierungen.

Anpassbare Impedanzelemente sind Maschinenelemente, bestehend aus einstellbaren Feder- und Dämpferelementen, welche in ihren Eigenschaften unabhängig voneinander eingestellt werden können [24]. Diese Elemente können als Schnittstellenelemente bei Untersuchungen von Leichtbaustrukturen eingesetzt werden und hierbei Schwingungsreduzierungen im Vibrationstest erreichen [25]. Durch eine optimale Einstellung der mechanischen Eigenschaften an der Schnittstelle einer Partition sind Schwingungsreduzierungen von bis zu 85% erreichbar [16].

3.3. Auslegungs- und Testprozesse

Um die in Kapitel 2.3 beschriebenen Herausforderungen bei der virtuellen Auslegung zu meistern, wird im Forschungsprojekt EFFEKT an der Entwicklung virtueller Testverfahren auf höheren strukturellen Detaillierungsebenen geforscht. In BILD 6 ist ein virtueller Testansatz auf Substruktur-Ebene dargestellt, welcher auf dem Wishbone-Ansatz nach Ostergaard et al. [27] aufbaut.

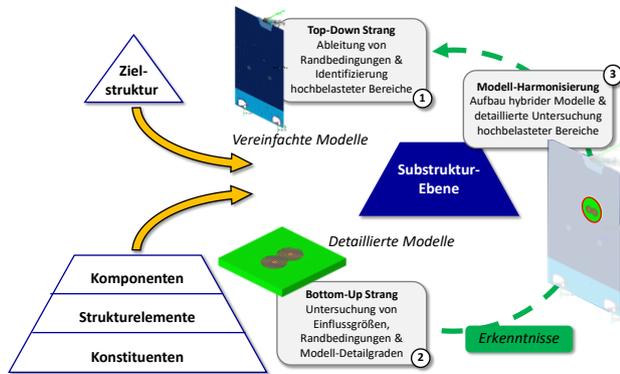


BILD 6. Ansatz zum virtuellen Testen von Sandwichstrukturen auf Substruktur-Ebene

Bei dem vorgestellten Ansatz wird ein Bottom-Up mit einem Top-Down Vorgehen kombiniert, welche auf Substruktur-Ebene zusammengeführt werden, wobei die Substruktur als eine Teilstruktur der betrachteten Zielstruktur verstanden werden kann.

In einem ersten Schritt werden initial vereinfachte Modelle der betrachteten Zielstruktur aufgebaut und hochbelastete Bereiche identifiziert. Durch eine Analyse der Zielstruktur und der umgebenden Struktur können außerdem realitätsnahe Randbedingungen für physische und virtuelle Tests auf unteren strukturellen Detaillierungsebenen abstrahiert werden.

Aufbauend darauf können in einem zweiten Schritt bestehende Modelle auf Komponenten-Ebene, welche beispielsweise durch den virtuellen Testansatz nach Seemann [9] implementiert werden können, sukzessive erweitert werden, wie dies beispielsweise in den Arbeiten Hartwich et al. [10] oder Schwan et al. [27] gemacht wird. Die Abstraktion der Testrandbedingungen erfolgt dabei auf Grundlage der Analyse der Randbedingungen der Zielstruktur. Hierdurch können der Testaufwand sowie äußere Einflüsse im Vergleich zu Full-Size Tests geringhalten und eine systematische strukturelle Annäherung an die Zielstruktur vorgenommen werden. Eine Quantifizierung des Einflusses unterschiedlicher Größen, insbesondere der Einfluss von Randbedingungen, Anbindungssteifigkeiten oder Lasteinleitung kann so erfolgen und die Erkenntnisse zur Optimierung bestehender physischer Testaufbauten und virtueller Modelle auch auf höheren Ebenen herangezogen werden. Zusätzlich kann bei der numerischen Modellerstellung auch der Abstraktionsgrad der Modelle, insbesondere bezogen auf den Detailgrad, die Abbildung von Versagensmechanismen sowie der Randbedingungen an den Systemgrenzen, ausgehend von detaillierten Modellen sukzessive reduziert werden. Eine Vereinfachung der Modelle kann somit unter Einbezug der numerischen Ergebnisse und einer Quantifizierung des Modellierungsfehlers vorgenommen werden. Hierdurch

können neben Empfehlungen zur virtuellen Modellierung auch Empfehlungen gegeben werden, wie möglichst realitätsnah physisch getestet werden kann.

In einem dritten Schritt kann nun die Harmonisierung der vereinfachten und detaillierten Modelle erfolgen. Durch die synergetische Kombination können vereinfachte Modelle genutzt werden, um das globale Strukturverhalten vorherzusagen und detaillierte Modelle, um eine detailgenaue Auslegung des lokalen Strukturverhaltens durchzuführen. Auch hier können die Erkenntnisse ebenfalls auf höhere strukturelle Detaillierungsebenen übertragen werden.

Der neue virtuelle Testansatz hilft dabei die Entwicklungszeiten und Kosten bei der Entwicklung neuer und innovativer Bauweisen zu verringern, indem bestehende virtuelle Modelle optimiert und somit der physische Testaufwand reduziert werden kann. Durch die Harmonisierung vereinfachter und detaillierter Modelle und die realitätsnähere Testaufbauten, kann außerdem eine genauere Auslegung der Bauweise ermöglicht und Sicherheitsfaktoren minimiert werden. Bisher erstellte virtuelle Modelle wurden für Sandwichstrukturen mit Nomex-Wabenkern aufgebaut, welche aufgrund des Materialverbunds und des anisotropen Materialverhaltens der Konstituenten ein komplexeres Strukturverhalten als andere Materialien aufweisen. Die Anwendung der virtuellen Testansätze ist allerdings auch auf weitere Materialien oder Materialverbünde möglich und kann somit die Auslegung von Bauweisen aus unterschiedlichen Materialien unterstützen.

Der physische Testaufwand spielt sowohl entwicklungsbegleitend, als auch in der anschließenden Zertifizierung weiterhin eine entscheidende Rolle. Zur Verkürzung von Produktentwicklungszeiten ist deshalb eine zeit- und kosteneffiziente Versuchsdurchführung bei gleichzeitiger Vermeidung globaler Sicherheitsfaktoren durch Überlagerung mehrerer Testbedingungen anzustreben. Folglich ist eine Unterstützung zur präzisen und lastgerechten Auslegung unter Berücksichtigung auftretender Lastverhältnisse notwendig. Ein Ansatz ist in BILD 7 skizziert. Er umfasst die Identifikation der auftretenden Wechselwirkungen und ihrer Einflüsse auf das Systemverhalten. Aus der Analyse auftretender Wechselwirkungen auf niedriger Komplexitätsebene gemäß der PKT-Pyramide können Rückschlüsse auf die Güte bisheriger Interpolationsverfahren und auf die Wahl der Sicherheitsfaktoren gezogen werden. Im Fall von nichtlinearen Wechselwirkungen sind zusätzliche überlagerte Tests auf Komponentenebene zur Analyse des Systemverhaltens durchzuführen. [28]

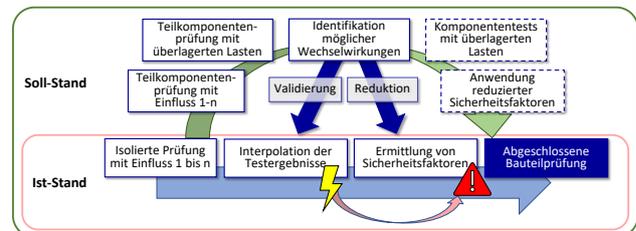


BILD 7. Ansatz zum überlagerten Testen [28]

In Konsequenz resultiert hierbei, neben einer leichtbau- und belastungsgerechten Gestaltung durch die Vermeidung konservativer Annahmen, auch potenziell eine Reduktion des Versuchsaufwands, da überlagerte Tests nur in relevanten Fällen auf höheren Ebenen der PKT-Pyramide durchzuführen sind.

4. ZUSAMMENFÜHRUNG DER ANSÄTZE

In Kapitel 3 wurden verschiedene Ansätze zur Entwicklung innovativer und gewichtsreduzierter Flugzeugkabinen-Bauweisen vorgestellt und gezeigt, wie eine effiziente Auslegung mittels virtueller Testverfahren und überlagerten Tests gewährleistet werden kann.

Einige der vorgestellten Ansätze können bereits kombiniert werden. So können insbesondere virtuelle Testverfahren den Gestaltungsprozess von Leichtbau-Bauweisen unterstützen. In BILD 8 ist ein Gestaltungsansatz für Sandwichstrukturen dargestellt, welcher im Rahmen der LuFo-Projekte CabinJoint und EFFEKT entwickelt wurde [20].

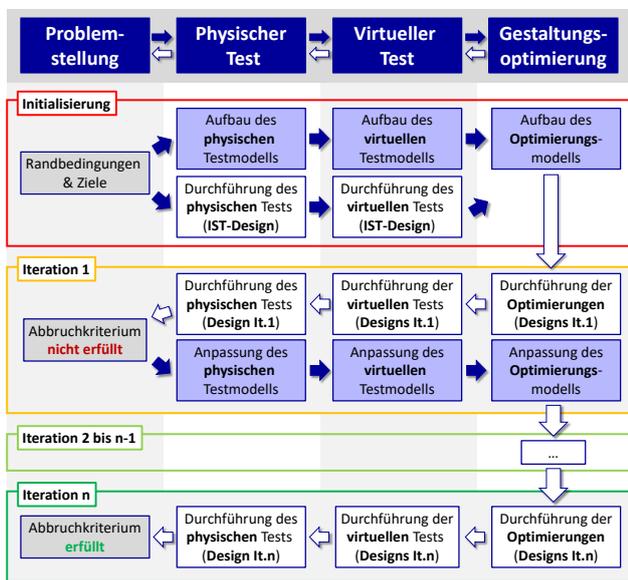


BILD 8. Gestaltungsansatz für Sandwichstrukturen unter Einbezug virtueller Tests [20]

Der Ansatz gliedert sich in die vier Hauptbereiche *Problemstellung*, *Physischer Test*, *Virtueller Test* und *Gestaltungsoptimierung* sowie unterschiedliche Iterationsphasen. In der Initialisierungsphase wird zunächst ausgehend von der Ausgangssituation und den definierten Anforderungen ein physisches Testmodell selektiert und physische Tests durchgeführt. Neben einer rein mechanischen Belastung ist es je nach Zielstellung auch möglich, physische Tests mit überlagerten Randbedingungen auszuwählen und durchzuführen. Falls kein geeigneter physischer Testaufbau vorliegt, muss ein neuer Aufbau entwickelt werden. Im nächsten Schritt erfolgt die Implementierung eines virtuellen Testmodells, wobei hierfür beispielsweise die in Kapitel 3.3 vorgestellten virtuellen Testansätze genutzt werden können. Zur Ermittlung verschiedener Gestaltungsalternativen wird zusätzlich ein Optimierungsmodell aufgebaut, welches bezogen auf den Detailgrad stark vom virtuellen Testmodell abstrahiert ist. In der ersten Iterationsphase werden die entwickelten Gestaltungsalternative zunächst virtuell vorselektiert und die beste Alternative physisch getestet.

Dieser Vorgang wird solange wiederholt bis ein Abbruchkriterium erreicht ist und ein geeignetes Design gefunden ist. [20]

Zwar ist der Gestaltungsansatz primär auf die Gestaltung des lokalen Designs von Sandwichstrukturen zugeschnitten, jedoch lässt er sich aufgrund des generischen Charakters auch auf die Gestaltung ganzer Kabinen-Monumente und andere Ansätze zur Entwicklung von Leichtbau-Bauweisen, welche in Kapitel 3.2 vorgestellt wurden, übertragen.

Während die Testansätze, wie der aufgeführte Gestaltungsansatz zeigt, gut mit Ansätzen zur Entwicklung von Leichtbau-Bauweisen kombiniert werden können, verfolgen die Ansätze zur Entwicklung einer modularen Bauweise und der einer Leichtbau-Bauweise teils konträre Ziele [29]. Dies wird beispielsweise bei der Betrachtung von Schnittstellen deutlich, welche bei einer modularen Bauweise zumeist überdimensioniert sind. Im Kontrast dazu sind die Schnittstellen, welche im Leichtbau entwickelt werden, gewichtsreduziert, wenn nicht sogar auf diese verzichtet werden kann [29, 30].

Eine Möglichkeit diese Ziele zu vereinen, stellt der Modulare Leichtbau dar, bei welchem die Modularisierung und die Leichtbauoptimierung parallel durchgeführt wird. Das Vorgehen des Modularen Leichtbaus besteht dabei aus sechs Schritten, wobei die Entwicklung einer modularen Leichtbauweise und einer Leichtbau-Bauweise und die anschließende Harmonisierung der beiden Bauweisen die Kernschritte des Vorgehens darstellen. Das Ergebnis des Vorgehens des Modularen Leichtbaus ist eine modulare Hybridbauweise, welche einen geeigneten Kompromiss zwischen einer Leichtbau-Bauweise und einer modularen Bauweise darstellt. [23; 30; 31]

Das Vorgehen des Modularen Leichtbaus sowie das Abbild einer exemplarischen modularen Hybridbauweise sind zusammenfassend in BILD 9 dargestellt.

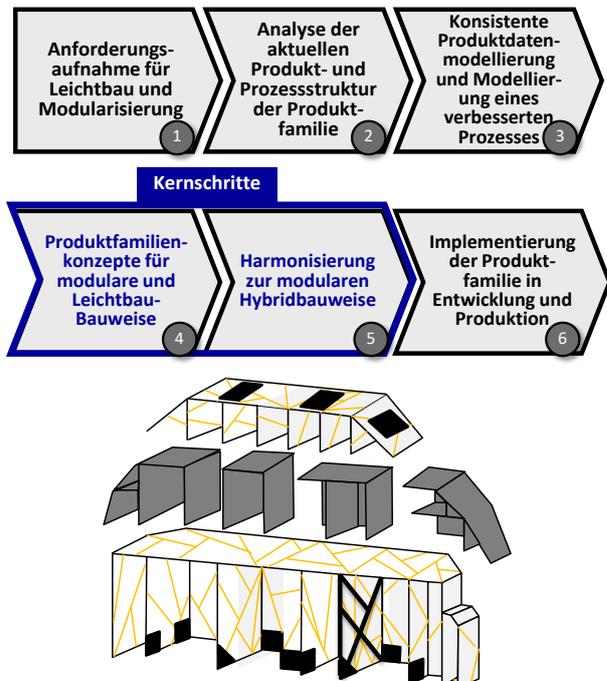


BILD 9. Modularer Leichtbau und resultierende modulare Hybridbauweise für eine Flugzeug-Galley, in Anlehnung an [Han21-a]

Zur Entwicklung der modularen Hybridbauweise kann beispielsweise der vorgestellte Gestaltungsansatz herangezogen werden. Weiterhin können die einzelnen Module aus unterschiedlichen leichtbaugerechten Bauweisen und Materialien kombiniert werden, wodurch auch eine Integration der in Kapitel 3.2 und 3.3 vorgestellten Ansätze in das Vorgehen des Modularen Leichtbaus möglich ist.

Durch die gemeinsame Betrachtung der unterschiedlichen Bereiche und Ansätze ergeben sich synergetische Effekte und Potentiale für die Entwicklung einer möglichst leichten und kostengünstigen Kabinenbauweise.

Eine Herausforderung bleibt allerdings die konsistente Verknüpfung der Daten über den gesamten Entwicklungsprozess und unterschiedliche Disziplinen hinweg, da u.a. unterschiedliche Modelle genutzt werden. Ein erster Ansatz, um dies modellbasiert zu lösen wird in [2; 32] aufgezeigt und in aktuell laufenden Forschungsprojekten erprobt.

Das Forschungsprojekt RECab hat das Ziel, die vorgestellten Ansätze aus den unterschiedlichen Bereichen noch stärker zu verknüpfen, um leichtbaugerechte, nachhaltige sowie modulare Hybridbauweisen-Konzepte zu erarbeiten (vgl. BILD 10).

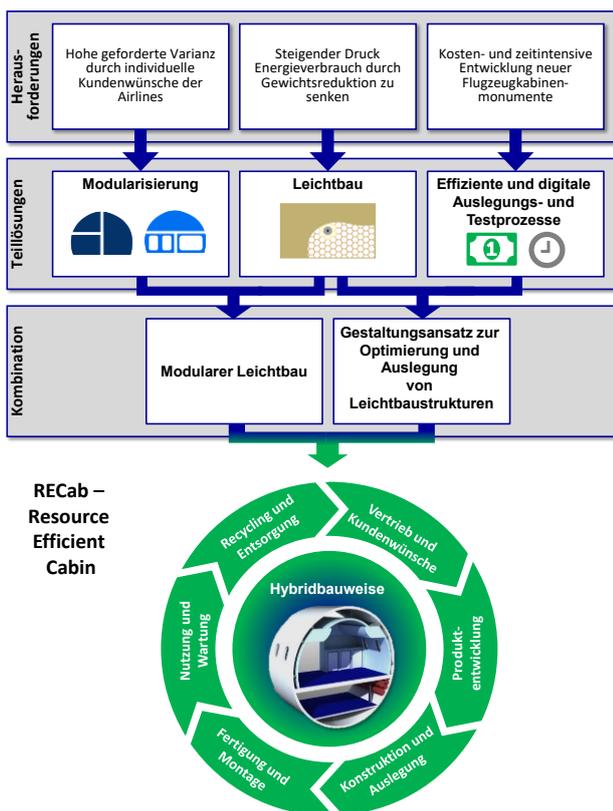


BILD 10. Neue innovative Ansätze zur Entwicklung in der Flugzeugkabine und deren Einfluss auf die ökoeffiziente Luftfahrt

Dazu sollen Nachhaltigkeitsaspekte noch stärker in die Entwicklung der Bauweisen miteinbezogen werden, beispielsweise indem die Nachhaltigkeit als Modultreiber berücksichtigt wird. Neben der Entwicklung nachhaltiger

Module soll weiterhin erforscht werden, inwieweit auch nachhaltige Leichtbau-Materialien in die Kabinen-Bauweise integriert werden können. Durch die Durchführung von Ökobilanzierungen über den gesamten Produktlebenszyklus und die Erweiterung des Wirkmodells Modularer Produktfamilien um Nachhaltigkeitsaspekte können sowohl einzelne Produktvarianten als auch ganze Produktfamilien hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit quantitativ verglichen und so das Ressourcenpotenzial durch die Kombination von Aspekten leichtbaugerechter und modularer Bauweisen ausgeschöpft werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Kostendruck und die steigende Notwendigkeit von Nachhaltigkeit in der Luftfahrt stellen besondere Anforderungen an die Flugzeugkabine und deren Bauweise dar. In diesem Beitrag wurden Herausforderungen bei der Entwicklung der Bauweisen in den Bereichen der Modularisierung und dem Leichtbau, ebenso wie bei der Umsetzung entwicklungsbegleitender Auslegungs- und Testprozesse aufgezeigt. Darüber hinaus wurden für die einzelnen Bereiche neue Ansätze vorgestellt, um diesen Herausforderungen zu begegnen und innovative Bauweisen für die Flugzeugkabine zu entwickeln. Mit dem Modularen Leichtbau und einem Gestaltungsansatz, welcher effiziente Auslegungs- und Testprozesse integriert, wurden Ansätze gezeigt, wie die unterschiedlichen Bereiche gemeinsam betrachtet werden können, um eine Hybridbauweise der Flugzeugkabine zu konzipieren. Neben den gezeigten integrativen Ansätzen soll in zukünftigen Projekten daran geforscht werden, wie Nachhaltigkeitsaspekte zukünftig noch stärker in die Entwicklung der Flugzeugkabine-Bauweise miteinbezogen werden können.

DANKSAGUNG

Teile des Beitrags wurden in den Forschungsprojekten Sektionsmontage und Systeminstallation im Verbundvorhaben (SeMoSys), Autonome nachhaltige Kabine; Untersuchung der Auswirkungen und Bewertung von modularen Produktstrukturkonzepten (ANKA), Additive Fertigung von Kabinenmonumenten mittels Direct Energy Deposition (DEPOSE), Ganzheitliche Betrachtung und Optimierung von Verbindungselementen für die Flugzeugkabine (CabinJoint), Effiziente Kabine durch digitale Vernetzung von Technologien und Systemen (EFFEKT) und New Cost Effective & Reliable Test Environments (CERTEV) erarbeitet, welche im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-1) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert werden.

LITERATUR

- [1] Hanna, M.; Schwenke, J.; Heyden, E.; Laukotka, F.; Krause, D.: Neue Trends in der Flugzeugkabinenentwicklung, in: Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungsergebnisse und -projekte der Jahre 2016 bis 2020, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2020, pp. 207-228. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62393-0_9
- [2] Hanna, M.; Schwenke, J.; Schwan, L.; Krause, D.: Methodical Approach for the Model-Based Development of Aircraft Cabin Product Families under Consideration of Lightweight and Cost-Based Design, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, Dubrovnik, Kroatien, 23.-26. Mai 2022, S. 435 - 444. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.45>
- [3] Breuer, U. P.: Commercial Aircraft Composite Technology. Basel: Springer International Publishing, 2016.
- [4] Ripperda, S.: Methodische Unterstützung zur kostenbasierten Auswahl modularer Produktstrukturen Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2019.
- [5] Krause, D.; Schwenke, J.; Gumpinger, T.; Plaumann, B.: Leichtbau, in: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. ISBN 978-3-446-45224-4, Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2018, S. 487-507.
- [6] Zenkert, D.: The handbook of sandwich construction. Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997.
- [7] Bitzer, T.: Honeycomb technology - Materials, design, manufacturing, applications and testing, London, New York: Chapman & Hall, 1997.
- [8] ESA Requirements and Standards Division: Space Engineering: Insert design handbook, ECSS Secretariat, Netherlands, 2011.
- [9] Seeman, R.: A Virtual Testing Approach for Honeycomb Sandwich Panel Joints in Aircraft Interior, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2020.
- [10] Hartwich, T. S.; Schwenke, J.; Schwan, L.; Krause, D.: Classification and Development of New Component Tests for Aircraft Cabin Interior, Proceeding of the 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20), Lausanne, Schweiz, 26.-30. Juni 2022.
- [11] Wright, J. R.; Cooper, J. E.: Introduction to aircraft aeroelasticity and loads, loads, John Wiley & Sons, Chichester, 2014.
- [12] Rasmussen, O.; Krause, D.: Influence of Load Elements on the Dynamic Behaviour of Light-weight, in: Estorff, O. v.; Thielecke, F. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST), Hamburg, 2017.
- [13] General Aviation Manufacturers Association: Publication no. 13 - acceptable practices document, cabin interior monument structural substantiation methods. General Aviation Manufacturers Association, Washington DC, 2009.
- [14] Heyden, E.; Hartwich, T. S.; Schwenke, J., Krause, D.: Transferability of Boundary Conditions and Validation of Lightweight Structures, Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX2019), Jesteburg, 2019, S. 85-96. <https://doi.org/10.35199/dfx2019.8>
- [15] Kim, J. et al.: An Experimental Approach for Structural Dynamic Modification of Fixture in Vibration Test Control, JSME International Journal Vol. 44 (2), 2001, S. 334–340.
- [16] Hüttich, P.; Heyden, E.; Krause, D.: A Numerical Model for Vibration Analyses of an Aircraft Partition with Parameterized Interface Properties, Proceeding of the 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20), Lausanne, Schweiz, 26.-30. Juni 2022.
- [17] Schwan, L.; Hüttich, P.; Wegner, M.; Krause, D.: Procedure for the transferability of application-specific boundary conditions for the testing of components and products, Proceedings of the 32nd Symposium Design for X (DFX2021), Tutzing, 27.-28. September 2021. <https://doi.org/10.35199/dfx2021.04>
- [18] Nagy, D.; Zhao, D.; Benjamin, D.: Nature-Based Hybrid Computational Geometry System for Optimizing Component Structure, in: Rycke, K. de et al. (Hrsg.): Humanizing Digital Reality. Design Modelling Symposium Paris 2017. Springer Singapore, Singapore, 2017, S. 167–176. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5_15.
- [19] Dambietz, F. M.; Hartwich, T. S.; Scholl-Corrêa, J.; Hoffmann, P.; Krause, D.: Influence analysis of the layer orientation on mechanical and metallurgic characteristics of DED manufactured parts, Procedia LIM21, 2021.
- [20] Schwenke, J.; Schwan, L.; Hanna, M.; Krause, D.: Ansatz zur lastpdfadoptimierten Gestaltung von Sandwichstrukturen mithilfe virtueller Tests und realitätsnahen Testaufbauten, Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022), Hamburg, 22.-23. September 2022. <https://doi.org/10.35199/dfx2022.05>
- [21] Schwenke, J.; Krause, D.: Optimization of load introduction points in sandwich structures with additively manufactured cores, Design Science, Vol. 6, E13, 2020. <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.10>
- [22] Schwenke J.; Hartwich T.; Krause D.: Optimierung von Inserts in Sandwichstrukturen durch additive Fertigung, in: Lachmayer R.; Lippert R., Kaieler S. (Hrsg.) Konstruktion für die Additive Fertigung 2018, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020, S. 243-259. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59058-4_14
- [23] Hanna, M.; Schwenke, J.; Schwede, L.-N.; Laukotka, F.; Krause, D.: Model-based application of the

methodical process for modular lightweight design of aircraft cabins, *Procedia CIRP*, Vol. 100, 2021, S. 637-642. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.136>

- [24] Heyden, E.; Lindenmann, A.; Oltmann, J.; Bruchmüller, T.; Krause, D.; Matthiesen, S.: Adjustable Impedance Elements for Testing and Validation of System Components, *Symposium Lightweight Design in Product Development*, Zürich, Schweiz, 2018, S. 45-47.
- [25] Heyden, E.; Lindenmann, A.; Krause, D.; Matthiesen, S.: Approach for Calibrated Measurement of the Frequency Response for Characterization of Adjustable Impedance Elements, *Journal of Sound and Vibration*, 2021.
- [26] Ostergaard, M. G.; Ibbotson, A. R.; Roux, O. L.; Prior, A. M.: Virtual testing of aircraft structures, in: *CEAS Aeronautical Journal*, No. 1, 2011, S. 83–103.
- [27] Schwan, L.; Schwenke, J.; Hartwich, T. S.; Krause, D.: Virtual Testing of Honeycomb Sandwich Structures with Multiple Load Introduction Points, *Proceeding of the 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20)*, Lausanne, Schweiz, 26.-30. Juni 2022.
- [28] Hüttich, P.; Panek, S.; Krause, D.: Combined environments - challenges and potentials in the realistic component testing, *Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022)*, Hamburg, 22.-23. September 2022.
<https://doi.org/10.35199/dfx2022.02>
- [29] Krause, D.; Gebhardt, N.; Greve, E.; Oltmann, J.; Schwenke, J.; Spallek, J.: New Trends in the Design Methodology of Modularization, *11th International Workshop on Integrated Design Engineering, IDE Workshop*, Magdeburg, 5. – 7. April 2017.
- [30] Hanna, M.; Schwenke J.; Krause, D.: Modularer Leichtbau – Chancen und Herausforderungen im digitalisierten Entwicklungsprozess, *Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX 2019)*, Jesteburg, 2019, S. 73-84.
<https://doi.org/10.35199/dfx2019.7>
- [31] Hanna, M.; Schwede, L.-N.; Schwenke, J.; Laukotka, F.; Krause, D.: Methodical Modeling of Product and Process Data of Design Methods Using the Example of Modular Lightweight Design, *Proceedings of the ASME 2021, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2021)*, 1.-5. November 2021, Virtual, Online.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2021-71259>
- [32] Schwan, L.; Hanna, M.; Schwenke, J.; Krause, D.: Modeling of an Interface Between System Models & FEM Models for the Support of Model-Based Development in Modular Lightweight Design for Aircraft Cabins, *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, Dubrovnik, Kroatien, 23.-26. Mai 2022, S. 1965-1974.
<https://doi.org/10.1017/pds.2022.199>