

# MODULARISIERUNGS- UND LEICHTBAUSTRATEGIEN FÜR OPTIMIERTE KABINENKOMPONENTEN ZUKÜNTIGER FLUGZEUGGENERATIONEN

Prof. Dr.-Ing. D. Krause, Dipl.-Ing. H. Jonas,  
Dipl.-Ing. T. Gumpinger, Dipl.-Ing. O. Rasmussen

Technische Universität Hamburg-Harburg  
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

## Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt Ansätze zur modularen Gestaltung von Kabinenkomponenten. Durch modulare Produkte kann die Komplexität für die Produktion gesenkt- und die Individualität für den Kunden beibehalten werden. Weiterhin werden Ansätze neuer Leichtbauweisen zur Senkung des Systemgewichts beschrieben.

## 1. EINLEITUNG

Airlines sind heutzutage einem immer stärker werdenden Wettbewerb ausgesetzt, in dem neben gesteigertem Komfort auch der Anspruch an eine bessere Umweltverträglichkeit des Fliegens mehr an Bedeutung gewinnt. Um sich von Wettbewerbern abzusetzen und die eigene Dienstleistung weiter zu optimieren, setzen die meisten Airlines auf individualisierte Kabinen- und Servicekonzepte.

Neben der individuellen Konfigurierbarkeit der Kabinenausstattung ist dabei weiterhin der Leichtbau ein entscheidendes Kriterium der Konstruktion. Vielfach stoßen etablierte Leichtbauweisen allerdings an ihre Grenzen und sind kaum noch weiter zu optimieren. In diesem Beitrag werden Ansätze zur konfigurierbaren, modularen Gestaltung von Kabinenkomponenten wie auch zu neuen Leichtbauansätzen aufgezeigt.

## 2. STAND DER TECHNIK – VARIANTEN UND KONFIGURATION

Um der Nachfrage der Airlines nach individuell gestalteten Kabinen nachkommen zu können, müssen die Lieferanten von Kabinenkomponenten eine sehr hohe Variantenvielfalt anbieten. Insbesondere größere Monamente, wie z.B. Galleys, Lavatories oder Stauschränke, werden in sehr individuellen Konfigurationen nachgefragt. Hier geht die produzierte Stückzahl pro Variante häufig gegen 1, ein individualisiertes Monument wird in diesem Fall also nur zur einmaligen Fertigung entwickelt. Gleichzeitig müssen aber auch bei jeder Variante die Luftfahrtanforderungen erfüllt werden, insbesondere der Nachweis der mechanischen Belastbarkeit. Die Einhaltung dieser Anforderungen kann zur Überdimensionierung bei nicht vorgeplanten Varianten führen und damit Mehrgewicht verursachen. Außerdem erfordert das Vorgehen ein hohes Maß an Flexibilität in der Fertigung und der technischen Entwicklung. Die hohe Varianz des Endproduktes erschwert dabei die Einführung und Beibehaltung von standardisierten Prozessen, was zu unregelmäßigen Auslastungen der Produktionskapazitäten führen kann.

## 3. OPTIMIERTE PRODUKTGESTALTUNG FÜR KABINENINTERIEUR

Ziel für eine optimierte Produktgestaltung ist es, die geforderte externe Marktvielfalt mit einer möglichst geringen internen Vielfalt darzustellen, Bild 1 [7]. Im vorliegenden Beitrag wird dabei die Strategie der Modularisierung verfolgt. Bei Verwendung einer modularen Produktstruktur kann die externe Marktvarianz durch wenige standardisierte Grundmodule realisiert werden. Allerdings können die Schnittstellen auch zu Mehrgewicht führen. Dies muss durch konstruktive Maßnahmen bei der Gestaltung des Moduls verhindert bzw. ausgeglichen werden.

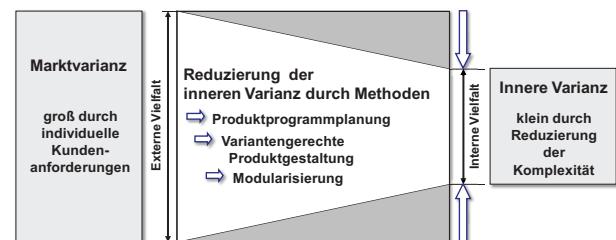


BILD 1. Marktvarianz und innere Varianz

Auch können durch die Modularisierung bestimmte Entwicklungsziele unterstützt werden, z.B. durch Zusammenfassung entsprechender Wartungs-, Recycling-, oder Montagemodule. Analog zur Moduldefinition kann auch die organisatorische Struktur so geplant werden, dass Teams z.B. in der Fertigung oder der technischen Entwicklung abgegrenzte Modulfähige bearbeiten.

### 3.1. Konzeptentwicklung

Zur Konzipierung einer modularen Bauweise für Monamente ist zunächst eine Analyse der geforderten Varianz durchzuführen. Dies können die bestehenden Varianten sein, aber auch für die Zukunft geplante Produktvarianten. Zudem sind weitere Einflussfaktoren, sogenannte Modultreiber, mit bei der Moduldefinition zu berücksichtigen, die jeweils Gründe für die Zusammenfassung von Komponenten in ein Modul

darstellen. Ein ausführliches Vorgehen zur methodischen Moduldefinition ist in [1] und [2] beschrieben. Als Übergabeschnittstelle der Moduldefinition im Konstruktionsprozess wird im beschriebenen Vorgehen der Module-Interface-Graph (MIG) genutzt. Der MIG stellt die Komponenten schematisch mit der erforderlichen strukturellen Verbindungen sowie den zwischen ihnen verlaufenden Leistungs-, Stoff- und Informationsflüssen dar. Die Komponenten werden in ihrer ungefähren Größe, Lage und Form eingezeichnet, um eine visuelle gestalterische Darstellung für die Modulbildung zu haben. Durch diese skizzenhafte Abbildung der Ausgangsstruktur des Produkts wird ein Überblick der Schnittstellen zwischen den Komponenten gegeben und es wird sichergestellt, dass Randbedingungen bezüglich der Lage von Komponenten berücksichtigt werden können. Nach der Moduldefinition erfolgt im Konstruktionsprozess die Ausgestaltung der Module, Bild 2. Insbesondere sind die gemeinsamen Schnittstellen übergreifend auszulegen, um Kompatibilität und Austauschbarkeit der Module zu gewährleisten.

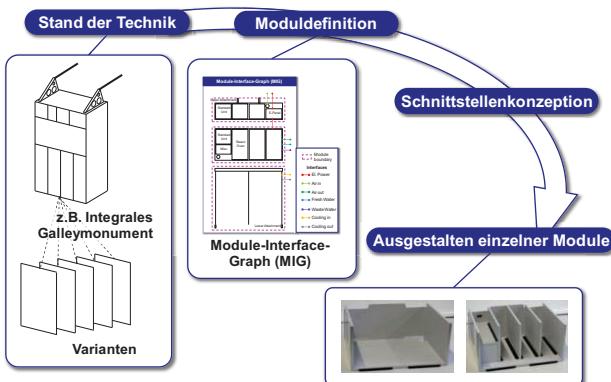


BILD 2. Entwicklung Modulkonzept

In Bild 3 dargestellt ist das Modulkonzept für eine Single-Aisle Galley [5]. Das untere Modul weist nur eine geringe Zahl von Varianten auf (Trolley-Anzahl invariant, Kühlungsart variabel). Es bildet hier die Basis-Plattform des Produktes. Im mittleren Bereich besteht eine hohe Varianz, diese wird durch einen vordefinierten Katalog von individuellen Hutmodulen abgebildet. Durch einheitliche Schnittstellen ist die Kombinerbarkeit verschiedener Module gewährleitet, solange diese das konstante Breitenmaß der Galley erfüllen.

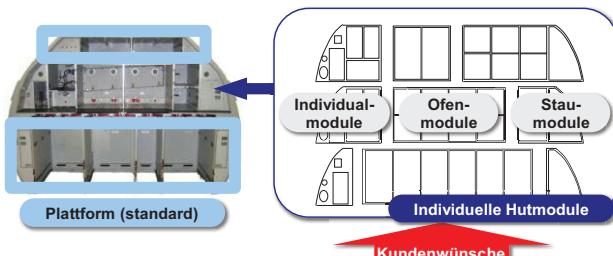


BILD 3. Plattformbauweise Single-Aisle Galley

In der Praxis werden dabei häufig Galleys mit 2 bis 5 mittig angeordneten Öfen verwendet. Bild 4 zeigt beispielhaft drei Konfigurationen, die unterschiedliche Kundenwünsche darstellen. Das Modul links nimmt

verschiedene Einheiten wie z.B. Kaffeemaschinen, Wassererhitzer oder Brötchenwärmer auf. Die Breite dieses Moduls ist für die gezeigten Konfigurationen konstant, sein innerer Aufbau kann aber variieren. Mittig angeordnet ist das Ofenmodul, welches entsprechend der Ofenzahl unterschiedliche Breiten hat. Das Modul rechts bietet Stauraum, entweder in Form von eingeschobenen Standard-Units oder nur durch Verwendung von Staufächern. Es variiert mit der Breite des Ofenmoduls und schließt den Bereich der Hutmodule nach rechts ab.

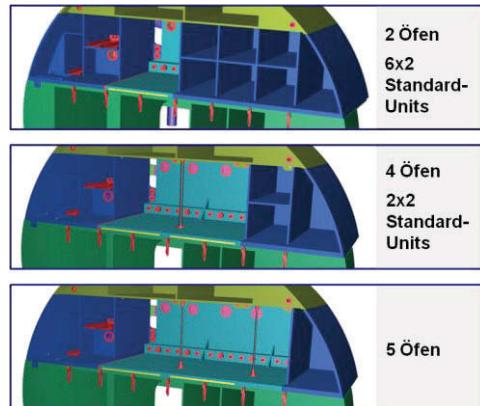


BILD 4. Beispielkonfigurationen Single-Aisle

Die gezeigte Konfigurierbarkeit reduziert die Komplexität in Entwicklung und Fertigung, weil durch Kombination der vordefinierten Module auf bereits vorhandene Lösungen zurückgegriffen werden kann. Somit entfallen aufwändige Neukonstruktionen und die Durchlaufzeit kann verkürzt werden. Auch können Module schon vorgefertigt werden, was eine gleichmäßige Auslastung der Produktionskapazitäten ermöglicht.

Die Konzipierung des Modulsystems erfolgte am Beispiel einer Single-Aisle Galley, Bilder 3 und 4. Im nächsten Abschnitt wird die Umsetzung des Konzeptes in einen Funktionsdemonstrator gezeigt, mit dem verschiedene Modulkonfigurationen real dargestellt werden können. Für dessen Aufbau wurde als Monument eine 4-Trolley Widebody-Galley gewählt.

### 3.2. Praxisbeispiel Moduldemonstrator

Aufbauend auf dem in 3.1 beschriebenen Konzeptansatz wurde die Modularisierung für den Demonstrator auf eine Widebody-Galley übertragen [6]. Die gewählte Widebody-Galley ist schmäler und nimmt nur 4 Trolleys auf. Nach einer Varianzanalyse wurde die Aufteilung hier mit 3 Modulen festgelegt. Dabei weist das untere Modul analog zur Single-Aisle Galley verschiedene Varianten der Trolleykühlung auf. Das obere Modul variiert bezüglich Größe und Einbaulage des elektrischen Bedien- und Sicherungspanels (E-Panel). Im mittleren Modul sind entsprechend den individuellen Kundenwünschen jeweils verschiedene Konfigurationen von Geräten und Staufächern verbaut. Dies reicht von der einfachsten Variante, die nur Standard-Units aufnimmt, bis hin zu individuellen Kombinationen von Kaffeemaschinen, Öfen, Eisschubladen etc.

Das Widebody-Modulsystem ist in Bild 5 dargestellt. Wie

auch bei der Single-Aisle Galley ist die Schnittstellenkompatibilität dabei von hoher Bedeutung. Einerseits dürfen die Schnittstellen die Gewichtsbilanz nicht negativ beeinflussen, andererseits müssen gute Montierbarkeit wie auch Modulaustauschbarkeit gegeben sein.

Bei der Gesamtauslegung der Schnittstellen kommt dabei das Prinzip der Überdimensionierung [7] zum Einsatz. In der konstruktiven Ausführung darf allerdings kein Mehrgewicht durch nicht genutzte Schnittstellen verursacht werden.

Das Mittelmodul kann über die Schnittstellen je nach Bedarf mit den gängigen Medienflüssen (Frischwasser, Grauwasser, elektrische Energie, Abluft) verbunden werden. Dadurch stehen innerhalb des Moduls alle Möglichkeiten der individuellen Ausgestaltung zur Verfügung. Ein vordefinierter Modulkatalog bildet dabei die gängigsten Kundenwünsche ab. Sonderanfertigungen sind somit immer noch möglich, erzeugen allerdings entsprechenden Zusatzaufwand in Konstruktion und Fertigung.

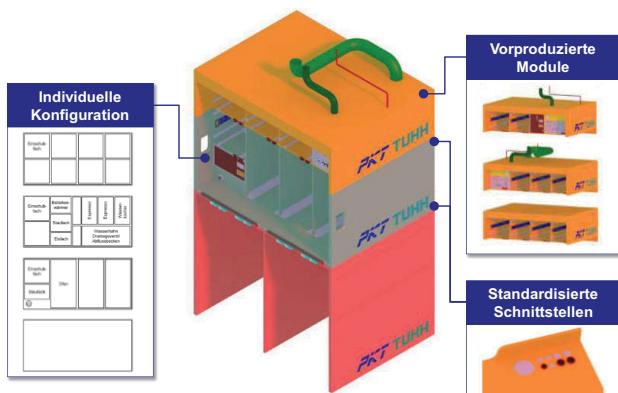


BILD 5. Konzept Widebody-Modulgalley

Zur prototypischen Umsetzung des Widebody-Modulkonzeptes wurde ein Demonstrator erstellt, Bild 6. Dieser bildet die Funktionalitäten des Konzeptes ab und kann mit verschiedenen Austauschmodulen entsprechend dem Modulkatalog bestückt werden.



BILD 6. Demonstrator Widebody-Modulgalley

#### 4. BAUWEISEN ZUR LEICHTBAUOPTIMIERUNG

Die Erzielung eines möglichst geringen Gewichtes ist weiterhin eine entscheidende Anforderung an die Auslegung und Konstruktion von Flugzeugteilen, insbesondere im Kabinenbereich. Der hohe Individualisierungsgrad der Komponenten erschwert hier allerdings eine durchgängige Leichtbauoptimierung jeder Variante. Somit sind neue Bauweisen gefragt, die variantenübergreifend als Technologiegrundlagen verwendet werden können. Dieser Abschnitt beschreibt dabei zwei neue Ansätze zur leichtbaugerechten Bauweise für Interieurkomponenten.

##### 4.1. Integration in Sandwichpanels

Die meisten Interieurmonumente nutzen Sandwich-Verbundwerkstoffe als strukturgebendes Material. Typischerweise wird Honeycomb-Werkstoff mit Wabenkern und GFK-Decklagen verwendet. Diese Platten werden im Laufe des Produktionsprozesses mit Beschlägen und Inserts versehen, die dann weitere Funktionsteile, wie z.B. Leuchtmittel oder Verkabelungen, aufnehmen können. Durch Nutzung des Prinzips der Funktionsintegration [3] [4] kann das Sandwichmaterial selbst genutzt werden, um geforderte Funktionalitäten gewichtssparend bereitzustellen. In Bild 7 ist dies am Beispiel Lichtfunktionen dargestellt.

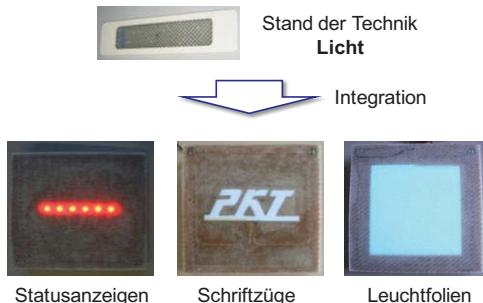


BILD 7. Integrierte Leucht- und Signalfunktionen

Die gezeigten Demonstratoren setzen unterschiedliche Funktionen im Bereich Licht/Signalgebung um. Im Stand der Technik wird meistens ein separates Leuchtmittel am Sandwich befestigt, z.B. eine Leuchtstoffröhre mit Kunststoffgehäuse. Diese Funktion lässt sich auch durch Integration von Leuchtfolien erreichen. Diese können auch als Designelement „Ambient Light“ verwendet werden. Die Leuchtfolie ist unter der äußeren GFK-Decklage integriert, die auch gleichzeitig als Isolator dient. Durch die Lichtdurchlässigkeit des GFK-Materials kann die Funktion kompatibel umgesetzt werden. Ein methodischer Ansatz zur Identifizierung dieser Kompatibilitäten ist in [4] beschrieben.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung von Leuchtfolien ist die Integration von Schriftzügen. Diese können als Werbe-, Informations-, oder Designelemente in Interieurteile eingebracht werden. Die Leuchtfolien zeichnen sich insbesondere durch einen geringen Verschleiß und einen niedrigen Energieverbrauch aus. Außerdem sind die Außenflächen des Interieurs, die durch den Einbau nicht beeinträchtigt werden, leicht zu reinigen. Des Weiteren ergeben sich Vorteile im Bezug auf den benötigten Bauraum der Installation. Die benötigte

Dicke der Sandwichpanels ist durch die mechanische Auslegung vordefiniert, weiterer Bauraum, z.B. für Schraubinserts oder Schutzgehäuse, wird für die Leuchtfolien nicht benötigt. Dadurch ergibt sich insgesamt eine hohe Gewichtseinsparung gegenüber der konventionellen Lösung mit externen Leuchtmitteln bei einem steigenden Maß an Gestaltungsfreiheit.

Auch können Leuchtdioden als Signalanzeigen oder Designelemente in das Sandwichmaterial integriert werden. Diese bieten ebenso wie die Leuchtfolien Vorteile durch lange Lebensdauer, geringes Gewicht und geringen Bauraum. Bei Verwendung von Leuchtdioden kann die Varianz durch Überdimensionierung der Anzahl abgedeckt werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Integration von elektrischen Leitungen und Elektronikkomponenten in Sandwichpanels. Bild 8 zeigt hierzu zwei Demonstratoren. Im Stand der Technik werden elektrische Leitungen in Form von Kabeln an den Außenseiten der Panels mit Inserts und Befestigungselementen geführt. Schalter werden typischerweise als Kippschalter in Bleche montiert und an gesonderter Position angebracht. In dem hier beschriebenen Ansatz werden elektrische Leitungen analog zu den Leuchtfolien ebenfalls in die Sandwichpanels integriert. Entweder können Kabel direkt in das Material eingebracht werden, oder das Glasfasermaterial wird selbst partiell durch Aufdruck von Silberleitlack leitend.



BILD 8. Integration von Leitungen und Elektronik

Das Einbringen von Silberleitlack ist rechts unten in Bild 8 prototypisch dargestellt. Durch Nutzung der vorhandenen Glasfasern werden keine zusätzlichen Elemente mehr benötigt, was Vorteile im Bezug auf Bauraum- und Gewichtseinsparung bringt.

#### 4.2. CFK-Stab/Schaum Verbundbauweise für Strukturteile

Die beschriebenen Sandwichpanels sind derzeit Stand der Technik für die Darstellung von flächigen Leichtbaustrukturen im Flugzeugkabinenbereich. Der Materialaufbau nutzt durch die Verwendung von Kernmaterial und Decklagen das Prinzip des I-Trägers aus, um bei minimalem Gewicht eine hohe Steifigkeit zu bieten. Da die flächigen Bauteile in der Anwendung jedoch häufig als Schubfelder belastet sind, tritt im Panel eine inhomogene Spannungsverteilung auf. Gerade bei komplexen Strukturen, z.B. dem Korpus einer Galley, führt

dies zu einer weitgehenden Überdimensionierung der Struktur, da die Panels jeweils für die punktuellen Spannungsüberhöhungen als ausschlaggebenden Faktor dimensioniert sein müssen.

Der neue Ansatz besteht darin, eine Verbundwerkstoffbauweise zu entwickeln, bei der die Lasten in den Panels durch CFK-Stäbe aufgenommen werden, deren Lage durch Topologieoptimierung an die Lastpfade angepasst ist. Die Stäbe liegen somit direkt im Kraftfluss des Schubfeldes. Um weiterhin die strukturgebende Funktion erfüllen zu können, wird das Panel selbst durch eine Schaumtechnologie dargestellt.

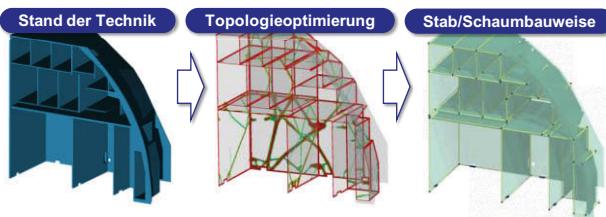


BILD 9. CFK-Stab/Schaum Verbundbauweise

Die auftretenden Lasten, die sich durch den Anwendungsfall ergeben, werden dann primär von den eingebetteten und lageoptimierten CFK-Stäben aufgenommen [8]. So können die Panels gezielt für den konkreten Lastfall ausgelegt werden und müssen nicht überdimensioniert werden. Bild 9 zeigt das Entwicklungsvorgehen. Über die Konzeptentwicklung hinaus ist geplant, diese Bauweise weiterzuentwickeln.

#### 4.3. Numerische und mechanische Analysen

Zur Gewichts- und Strukturoptimierung von Bauteilen im Kabinenbereich sind die Möglichkeiten zur sicheren mechanischen Analyse von Bedeutung. Um Prüfumfänge zu reduzieren und die Entwicklungszeiten zu verkürzen werden vermehrt numerische Verfahren in Kombination mit realen Tests eingesetzt, Bild 10. Ziel ist es dabei, ein Simulationsmodell zu quasistatischen und dynamischen Untersuchungen von komplexen Verbundstrukturen zu erstellen und anhand eines Abgleichs mit Realversuchen zu validieren. Hierbei ist es notwendig, außer der Abbildung von Composite-Strukturen auch die Möglichkeiten der Kopplung zwischen MKS und FEM mit einzubeziehen. Dazu muss die eingesetzte Simulationssoftware in der Lage sein, entsprechende Kinematikelemente per MKS bei der Berechnung zu berücksichtigen.

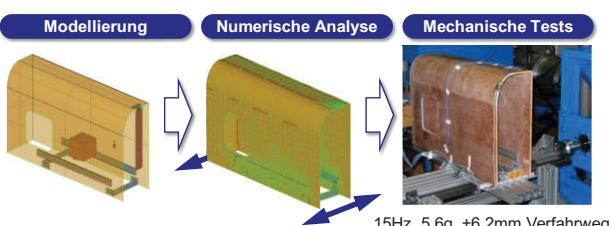


BILD 10. Vorgehensweise zur Analyse

Die vom Simulationsmodell generierten Ergebnisse werden mit am Realobjekt ermittelten Beschleunigungs- und Dehnungs-Messwerten verglichen; außerdem wird bei den dynamischen Analysen ein Vergleich der Ergebnisse von simulierter und experimenteller Modalanalyse durchgeführt. Um in Zukunft auch komplexe Beanspruchungsfälle an Großbauteilen testen zu können, wird an der TUHH eine Hexapodprüf-anlage aufgebaut, die ein gleichzeitiges Testen in allen 6 Freiheitsgraden ermöglicht. Im Gegensatz zu einem 1-Achsigem Hydropulser ermöglicht die Hexapodkonfiguration die gleichzeitige Manipulation aller 6 Achsen, Bild 11.



BILD 11. Hydropulser und Hexapodprüf-anlage

Der von der DFG geförderte und im Bau befindliche Prüfstand kann Großbauteile mit einem Prüfkörpergewicht von bis zu 1t unter allen Arten von multiaxialen Spannungszuständen testen, um darauf basierend neue Richtlinien für die Konstruktion und Auslegung zu entwickeln. Die Hexapodanordnung bietet dabei ein maximales Maß an Prüfstandssteifigkeit.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Individualisierbarkeit und Leichtbauoptimierung sind nach wie vor wichtige Grundkriterien, die an die Entwicklung von Kabinenkomponenten gestellt werden. Im vorliegenden Beitrag wurde das Prinzip der modularen Gestaltung vorgestellt und beispielhaft am Kabinensystem der Galley angewendet. Durch modulare Produkte ist es möglich, dem Kunden (Airline) ein hohes Maß an Produktindividualität anzubieten, andererseits aber die interne Komplexität für den Hersteller zu reduzieren.

Um das Gewicht der Komponenten weiter zu senken, wurden zwei Ansätze für Leichtbauweisen aufgezeigt. Dabei können bereits vorhandene Strukturelemente genutzt werden, um zusätzliche Funktionen zu integrieren und somit Gewicht und Bauraum einzusparen. Das Konzept der neuen CFK/Schaum-Verbundbauweise ermöglicht Leichtbau durch Ausnutzung der realen Lastpfade im Bauteil.

Die vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen mehrerer durch die Luftfahrtforschung der Freien und Hansestadt Hamburg geförderter Projekte entstanden.

## 6. LITERATUR

- [1] Blees, C.; Jonas, H.; Krause, D.: "Entwurf von modularen Produktarchitekturen unter Betrachtung unterschiedlicher Unternehmenssichten", Design for X, Beiträge zum 19. Symposium, Neukirchen (2008) pp. 149-158.
- [2] Blees, C.; Jonas, H.; Krause, D.: "Perspective-Based Development of Modular Product Architectures", Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED), Stanford, USA (2009) pp. 4-95-4-106.
- [3] Gumpinger, T.; Krause, D.: "Potenziale der Methode Funktionsintegration beim Leichtbau von Flugzeugküchen", Design for X, Beiträge zum 19. Symposium, Neukirchen (2008) pp. 111-118.
- [4] Gumpinger, T.; Jonas, H.; Krause, D.: "New Approach for Lightweight Design: From Differential Design to Integration of Function", Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED), Stanford, USA (2009) pp. 6-201 - 6-210.
- [5] Jonas, H.; Gumpinger, T.; Blees, C.; Krause, D.: "Innovative Design of a Galley Product Platform by applying a new Modularisation Method", 4th International Conference "Supply on the Wings", Frankfurt/Main (2009)
- [6] Jonas, H.; Gumpinger, T.; Krause, D.: "FlexGalley - Innovative Approach for a Modular Design of an Aircraft Galley", 2nd CEAS European Air and Space Conference, Manchester, England (2009)
- [7] Kipp, T.; Krause, D.: "Design for variety - efficient support for design engineers", 10th International Design Conference - Design 2008, Dubrovnik (2008) pp. 425-432.
- [8] Kipp, T., Gumpinger, T., Krause, D.: "Räumlichkeitsstruktur, insbesondere zur Verwendung für Galleys", Offenlegungsschrift zu EP2184231A1