

# PRODUKTVALIDIERUNG VON LEICHTBAUSTRUKTUREN FÜR DIE FLUGZEUGKABINE

Dieter Krause, Ralf Seemann, Jan Oltmann, Olaf Rasmussen

Technische Universität Hamburg-Harburg  
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Denickestraße 17  
21073 Hamburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Zur Einrichtung der Flugzeugkabine steht aufgrund individueller Anforderungen der Airlines eine stetig wachsende Auswahl unterschiedlicher Produktvarianten zur Verfügung. Für die Produktentwicklung hat dies eine deutliche Aufwandssteigerung zur Folge. Neben den individuellen Komfortanforderungen stellt gleichzeitig die Sicherheit der Passagiere hohe Anforderungen an diese Leichtbauprodukte. Daher müssen neben Strategien zur variantengerechten Produktstrukturierung, wie der Modularisierung von Produktfamilien, auch systematische Vorgehensweisen zur effizienten Auslegung und Validierung dieser Produktfamilien erforscht werden. In dem Beitrag werden methodische Ansätze zur Beherrschung der Variantenvielfalt bei gleichzeitig hohen Leichtbauanforderungen vorgestellt.

## 1. EINLEITUNG

Die Entwicklung von virtuellen Tests hat das Potential, die Effizienz der Strukturanalyse in der Produktentwicklung deutlich zu erhöhen. Es kann eine Vielzahl von varianten Komponenten effizient ausgelegt und überprüft werden. Außerdem ermöglichen Simulationen die Optimierung von Leichtbaustrukturen, um eine möglichst gewichtssparende Lösung zu erhalten. Nichtsdestotrotz müssen immer auch vergleichsweise zeit- und kostenintensive Realtests zur Modell- und Produktvalidierung in den Produktentwicklungsprozess einfließen. Ziel ist es, durch synergetische Kombination aus Simulation und Test den notwendigen Testaufwand zu reduzieren und die Produktqualität zu erhöhen.

Das Zusammenspiel aus Simulation und Test muss dazu durch eine hierarchische Vorgehensweise gestaltet werden, in der das Produkt in verschiedenen Ebenen seiner strukturellen Komplexität betrachtet wird (BILD 1). Die Schwierigkeit hierbei ist die Festlegung der erforderlichen Hierarchieebenen, da diese sehr von der Problemstellung und damit von dem Produkt und dem betrachteten Auslegungsfall abhängen. Mit dem Entwicklungsfortschritt einer Komponente nimmt auch die Prüfkörperkomplexität zu. Dies führt zu steigenden Anforderungen und Unsicherheiten bei Versuchen. Zudem sind bei Hybridbauteilen gerade die Verbindungstechnik/-stellen von großer Bedeutung. Dies kann jedoch erst mit fortschreitendem Entwicklungsfortschritt berücksichtigt werden, da ihr Strukturverhalten vom Anwendungsfall und von der Konstruktion abhängt, wie z.B. die Klebefläche, Gestalt oder Belastungsart.

## 2. STATISCHE AUSLEGUNG VON LEICHTBAUPRODUKTEN

Am Beispiel von Inserts für Sandwichkonstruktionen ist eine Untersuchung an dem Auszugstest durchgeführt worden, um Erkenntnisse der Versagensmechanismen und der Modellabbildung in der FEM entwickeln zu können. Um auf der Komponentenebene (im BILD 1 Ebene 3) diese Simulation zu ermöglichen, sind eine Reihe von Vorabuntersuchungen auf den beiden unteren Ebenen, die der Konstituenten, wie hier für die Decklagen, Honigwaben aber auch für die Klebeschicht oder Pottingmasse, und auf der Ebene der Strukturelemente, wie das Sandwich und die unterschiedlichen Inserts, vorab zu untersuchen. Mit den gewonnenen Materialparametern kann das Materialmodell erstellt werden, um die Versagensmechanismen auf der Ebene der Komponenten vorhersagen zu können. Detaillierte Informationen zu der exakten Modellbildung und Festlegung der Randbedingungen sind in BILD 2 dargestellt und finden sich unter [2].

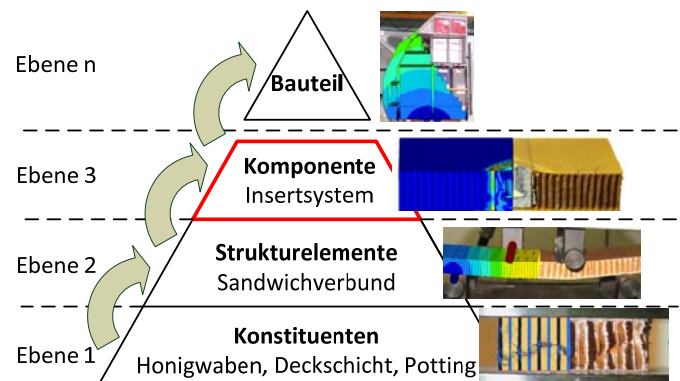


BILD 1. Virtuelles und reales Testen am Beispiel von Sandwichkonstruktionen

Der Vergleich zwischen realem Test (rot) und virtuellem Test (blau) in BILD 2 zeigt, dass die unterschiedlichen Versagensarten sehr gut vorhergesagt werden.

So wird die erste Nicht-Linearität im Verlauf durch Schubbeulen der Zellwände verursacht. Das eigentliche Versagen wird durch das Ablösen des Inserts von der unteren Deckschicht initiiert. Erst danach löst sich oben die Deckschicht ab und reißt ein [2].

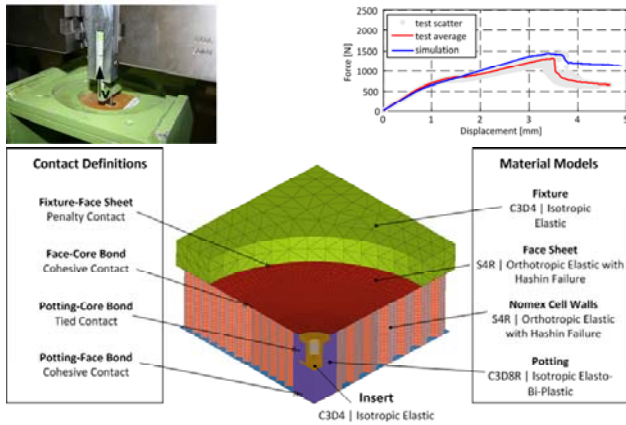


BILD 2. Virtueller und realer Test von Inserts im Vergleich nach [2]

Weitere Vergleichstest mit anderen Konstituenten und Inserts sowie die Übertragung auf andere Komponententests sollen folgen, um die Vorgehensweise des Ersetzens von realen Tests zu virtuellen Tests langfristig zu ermöglichen. Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der virtuellen Tests soll für die Entwicklung neuartiger Inserts eingesetzt werden, um die Kernfüllmasse zu reduzieren oder zu vermeiden.

### 3. DYNAMISCHE AUSLEGUNG VON LEICHTBAUPRODUKTEN

In der Auslegung von Flugzeug-Kabinenkomponenten wird der Einfluss von dynamischen Lasten bedingt durch größer werdende Triebwerke in Bezug auf die Windmilling-Randbedingungen immer größer. Der Zulassungstest reduziert die dynamischen Lasten auf eine quasistatische Beanspruchung. In den durchgeführten Untersuchungen geht es um die Abbildung der dynamischen Lasten, die den Realfall deutlich besser abbilden.

Für die Tests steht an der Technischen Universität Hamburg-Harburg der von der DFG geförderte Hexapod-Prüfstand zur Verfügung (BILD 3).

Mit ihm können voll beladene Galleys mit einem Gewicht bis zu 1,5 to und einer Größe von 6 x 1 m dynamisch in allen drei Raumrichtungen einzeln oder kombiniert beansprucht werden. Zudem ist die Prüfvorrichtung auch für mehraxial quasi-statische Tests von kleineren Komponenten mit einer Höhe von 0,1 bis 1,5 m geeignet, wenn man den blau dargestellten Stempel entfernt, siehe [3,4].

Leistungsdaten	
• Kombinierte Winkel: $\pm 5^\circ$ (max. $\pm 12^\circ$ )	• Einzelkräfte: bis 500 kN
• Kombinierte Wege: $\pm 150$ mm (max. $\pm 300$ mm)	• Einzelmomente: bis 40 kNm
• Arbeitsfrequenz: bis 30 Hz	• Geschwindigkeiten: bis 1 m/s



BILD 3. Hexapod-Prüfstand am Institut PKT der TUHH

Neben Entwicklungsversuchen für den A320neo für Airbus für unterschiedliche Monumente der Kabine wurden am Institut Versuchsreihen mit unterschiedlichen Belastungszuständen von Galleys und Galleymodulen, Trennwände mit unterschiedlichen Konfigurationen, wie z.B. mit und ohne Baby-Basement, Monitor, Zeitschriftenhalter und getestet, um insbesondere das Schwingverhalten, Eigenmoden und Dämpfungswerte zu ermitteln. Auch hier ist es das Ziel, die Erkenntnisse aus den Versuchen auf FE-Simulationen zu übertragen und bessere Ergebnisse über den heutigen Stand der Vorhersage zu erreichen.

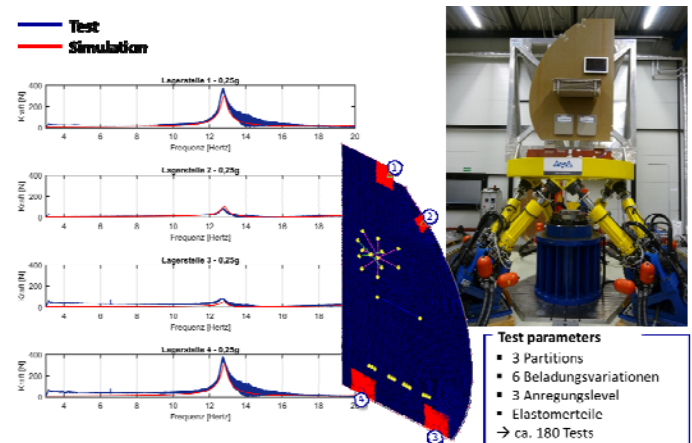


BILD 4. Virtueller und realer Test von dynamischen Beanspruchungen einer Trennwand im Vergleich

Im BILD 4 ist exemplarisch ein Vergleich der durchgeführten Testergebnisse mit den erstellten Simulationsergebnissen dargestellt, die eine sehr gute Übereinstimmung aufzeigen. Eine ausführliche Vorstellung der Ergebnisse dazu findet man in [5,6]. Um eine beliebige Konfiguration von unterschiedlichen Ausstattungen einer Trennwand belastungstechnisch simulieren zu können, sind auch hier Voruntersuchungen auf Strukturebene nach dem Pyramidenmodell notwendig, um auf eine hohe Güte der Simulationsergebnisse zu gelangen.

Neben den Untersuchungen der einzelnen Kabinenmonumente werden auch die Schnittstellen zur Rumpfstruktur näher untersucht. Es hat sich herausgestellt, dass der Einfluss dieser Schnittstellen auf das dynamische Schwingverhalten der Untersuchungsobjekte immens ist.

Sogar unterschiedliche Einspannungen, die nur für die Vorversuche vereinfacht wurden, beeinflussen das Ergebnis erheblich und führen letztendlich zu verfälschten Dämpfungswerten [7].

Man kann aber auch gezielt die heute auf hohe Steifheit ausgelegten Anbindungsstellen von Kabinenmonumenten bewusst mit Dämpfungselementen versehen, um das dynamische Verhalten sowohl durch eine Verschiebung der Eigenfrequenzen als auch eine Verringerung der Schnittstellenkräfte gezielt zu verändern. Erste Untersuchungen mit kommerziell verfügbaren Elastomerdämpfern haben gezeigt, dass eine sehr gute Beeinflussungsmöglichkeit durch den Einbau von Dämpfern möglich ist (BILD 5). Weitere Untersuchungen zur Entwicklung geeigneter Dämpfer sollen folgen. Im Idealfall sollen sich diese Dämpfer an die unterschiedlichen Randbedingungen, sei es die ausgewählte Konfiguration, die Belastungssituation, die Erreger- oder die Eigenfrequenz, dynamisch anpassen [8].

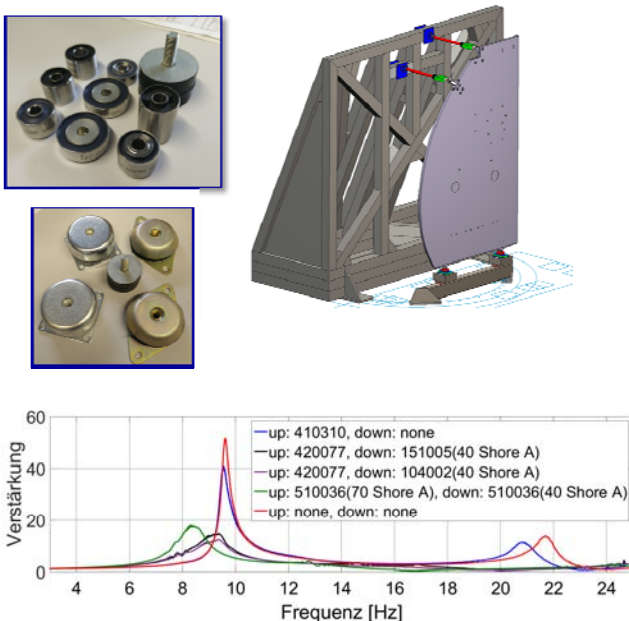


BILD 5. Unterschiedliche Schnittstellendämpfer zur Schwingungsreduktion

#### 4. METHODISCHE ANSÄTZE ZUR BEHERRSCHUNG VON VARIANTENVIELFALT UND DES LEICHTBAUS IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

Insbesondere zur Gestaltung der Flugzeugkabine nehmen Airlines einen großen Einfluss und möchten ihre Vorstellungen für ihre Einsatzbedingungen erfüllt bekommen. Dies beginnt bei der Farbgestaltung und geht hin bis zu unterschiedlichen Konfigurationen der Kabine und deren einzelner Monumente. Die Hersteller von Monumenten sind verpflichtet, die Flugtauglichkeit jeder Ausführungsvariante nachzuweisen, wie z. B. durch die Windmilling-Spezifikation definiert ist. Dies führt zu einer Vielzahl an Tests auf Monumentenebene. Auch die Verwendung neuer Konstituenten oder neuer Komponenten führen zu einer Reihe von erforderlichen Tests gemäß des Building-

Block Ansatzes der Testpyramide, wie im BILD 6 zusammenfassend dargestellt ist. Je weiter oben die konstruktive Änderung erforderlich ist, desto mehr Tests sind notwendig, um die Änderung abzusichern. Man kann sich gut vorstellen, dass mit zunehmender Anzahl an Variationen die Anzahl an Tests stark ansteigt. Dies soll BILD 7 verdeutlichen, in dem zusätzlich zur Test-Pyramide die Dimension der Produktvarianz hinzukommt. Das Ziel ist es, den Testaufwand zum einen innerhalb einer Pyramide, wie vorab gezeigt durch z.B. virtuelles Testen oder des Konfigurationsansatzes für die Trennwand, und zum anderen die Vielfalt an Tests durch die hohe Anzahl an Produktvarianten zu reduzieren, wie im BILD 7 visuell durch die blauen Pfeile dargestellt ist. Dies kann man erreichen, in dem auf der mittleren Ebene möglichst wenige Module, die in unterschiedlichen Produktvarianten zum Einsatz kommen können, benötigt werden. Dafür eignen sich modulare Produktstrukturen, die anstelle einer Variantenkonstruktion eine Variantenkonfiguration für eine zu betrachtenden Produktfamilie mit all ihren Produktvarianten ermöglicht.

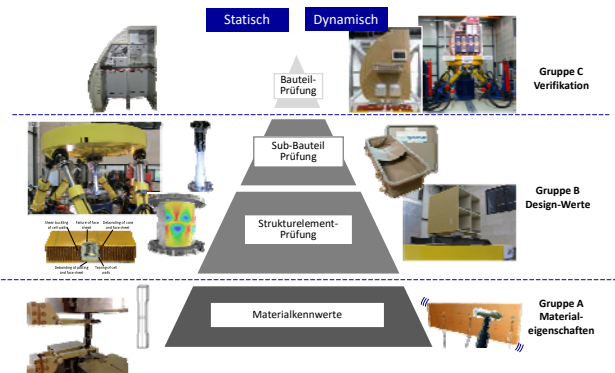


BILD 6. Testpyramide angewendet auf Flugzeug-Kabinen

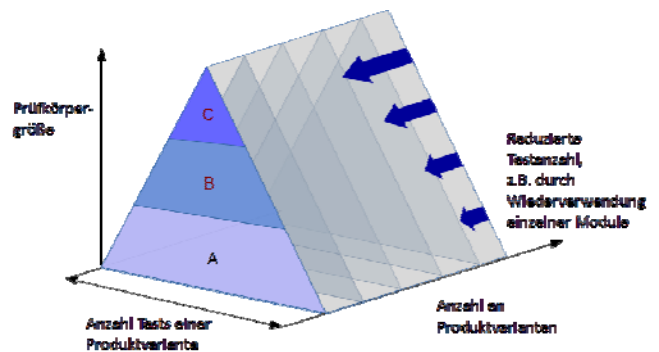


BILD 7. Reduktion der nötigen Versuche in einer Produktfamilie

Mit der modularen Bauweise erzielt man eine Reihe von Vorteilen zur Reduzierung und Beherrschung der internen Vielfalt und trägt zur Komplexitätsreduzierung innerhalb eines produzierenden Unternehmens und damit letztendlich zur Reduzierung der Kosten, nämlich der sogenannten Komplexitätskosten, wesentlich bei (BILD 8). Es

steht außer Frage, dass ab einer vom Markt geforderten Produktvielfalt eine modulare Produktarchitektur für die Gesamtheit einer Produktfamilie von Vorteil ist. Ein weiterer positiver Aspekt stellt der Skaleneffekt durch die Wiederverwendung von Modulen dar, der beispielsweise auch den Testaufwand verringert. Durch die reduzierte Kompliziertheit eines Produktes und durch möglichst in sich abgeschlossene Module mit möglichst eindeutigen und einfachen Schnittstellen wird auch die Auslegung und Tests solcher Module vereinfacht. Auch ist es häufig einfacher, nur Tests auf der Modulebene anstelle von aufwändigeren Tests am Gesamtprodukt durchzuführen.

Nachteilig wirkt sich es sich dagegen aus, dass ein modulares Produkt die Anforderungen des Kunden meist nicht exakt treffen und daher an einigen Stellen immer überdimensioniert sein wird, was zu zusätzlichem Gewicht führt. Um die Modulbildung durchzuführen, werden meist zusätzliche Schnittstellen erforderlich, die auch Gewicht kosten. Diese beiden Gegenargumente sprechen häufig bei Leichtbauprodukten gegen eine modulare Bauweise. Im Flugzeugbau wird eine Gewichtserhöhung nicht akzeptiert und stellt ein klares KO-Kriterium dar. Hier werden bevorzugt die Leichtbaubauweisen, wie Material-, Struktur- oder Systemleichtbau in Kombination mit speziellen Fertigungsprozessen eingesetzt, um eine möglichst leichte Konstruktion zu erzielen. Nachteilig wirkt sich dann die Übertragbarkeit auf Produktvarianten aus, was meist einen höheren Aufwand verursacht, der gerade durch den zusätzlich erforderlichen Testaufwand nicht unerheblich werden kann.

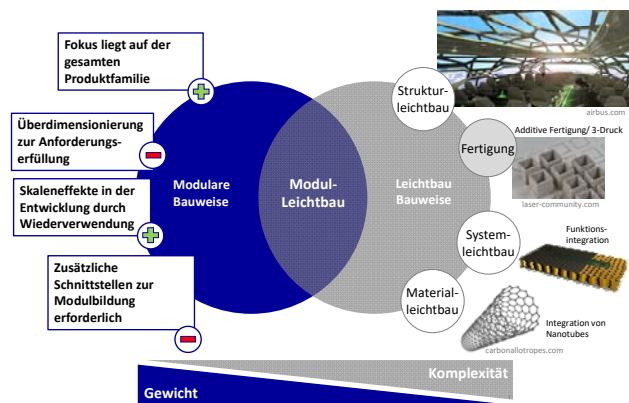


BILD 8. Spannungsfeld bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte

Trotz der widersprüchlichen Ziele der modularen Bauweise auf der einen Seite und der Leichtbau-Bauweisen auf der anderen Seite muss es für variantenreiche Leichtbauprodukte das Ziel sein, beide Bauweisen geschickt zu vereinen. Dafür wird der neue Begriff Modul-Leichtbau geprägt.

Für die Entwicklung von modularen Produkten werden am Institut PKT seit ca. 10 Jahren im Rahmen des *Integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung von modularen Produktfamilien/-programmen* Methoden entwickelt (BILD 9) [9,10]. Meistens wird von einer bestehenden Produktfamilie ausgegangen, die dann im Rahmen einer Produktgenerationsentwicklung modularisiert wird. Da die modulare Struktur u.a. auch von dem bestehenden Produktentstehungsprozess abhängig ist, sollten die Prozesse mit

betrachtet und passend zu der Produktstruktur im Sinne der Komplexitätsreduzierung, z.B. durch Postponement- oder Kommunalitätsstrategie, verbessert werden. Als dritte wesentliche Zielgröße neben einer möglichst geringen internen Produkt- und Prozessvarianz ist ein möglichst geringes Gewicht der gesamten Produktfamilie bei Leichtbauprodukten relevant. Im Gegensatz zu den bestehenden Leichtbaustrategien steht beim Modulleichtbau das möglichst geringe Gewicht der gesamten zu betrachtenden Produktfamilie im Fokus. Um es klar herauszustellen, es geht nicht um die Gewichtsoptimierung einer Produktvariante, sondern um das sogenannte Produktfamiliengewicht. Nimmt man die Anzahl an möglichen Verkaufszahlen pro Variante mit in die Betrachtung auf, so kann man auch von einer Optimierung des Flottengewichtes sprechen.

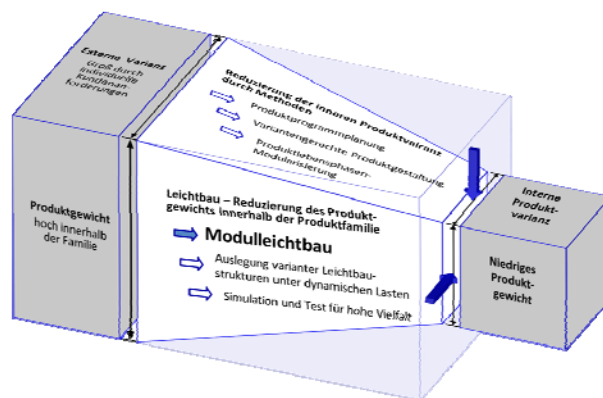


BILD 9. Integrierter PKT-Ansatz zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der Produktentwicklung

Mit diesem anderen Fokus auf die Gewichtsreduzierung kann man neue kombinierte Herangehensweise entwickeln, die dem Begriff Modul-Leichtbau gerecht wird.

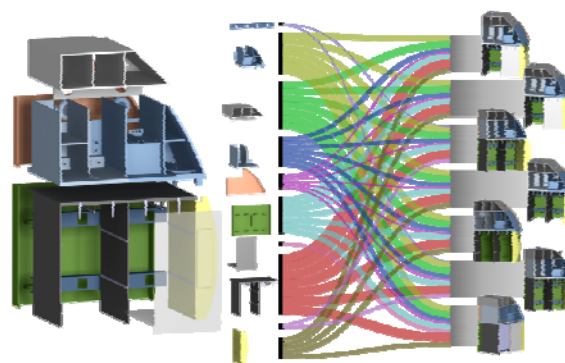


BILD 10. Modularisierung einer Flugzeuggalley und deren Zusammenhänge nach [11]

Betrachtet man beispielsweise die in BILD 10 dargestellte modularisierte Produktfamilie einer Galley, die noch nicht gewichtsoptimiert ist, so sieht man, dass die Module in unterschiedlichen Produktvarianten, rechts dargestellt, häufig eingesetzt werden. Jede Variante hat an die Module etwas andere Anforderungen, z.B. aufgrund unterschiedlicher Ausstattungsmerkmale, wie die Verwendung von keiner, einer oder mehrerer Kaffeemaschinen im mittleren blauen Modul. Aufgrund dieser unterschiedlichen

Ausstattung ergeben sich unterschiedliche Belastungsrandbedingungen bezogen auf die einzelnen Module. Dies bedeutet aber auch gleichzeitig, dass für andere Produktvarianten bestimmte Module überdimensioniert sind, wie am Anfang des Kapitels schon erwähnt.

Um diese Überdimensionierung bezogen auf die gesamte Produktfamilie zu optimieren, wurde ein interaktives Vorgehen entwickelt, um heraus zu bekommen, welche Module zu stark überdimensioniert sind. Hierfür wird mittels der FEM sowohl für jede Variante als auch jedes Modul in jeder verbauten Variante die Überdimensionierung aus der tatsächlichen Dehnung zu der noch zulässigen Dehnung ermittelt. Bei einer vorhandenen Überdimensionierung wird eine Sandwich-Decklage entfernt, bei einer Unterdimensionierung eine Decklage ergänzt. Nach mehreren Iterationsstufen nivelliert sich die Überdimensionierung bei dem dargestellten Beispiel auf einen Wert unter 2% ein und reduziert so das Flottengewicht erheblich. Die vollständige Beschreibung der Methode findet man unter [11].

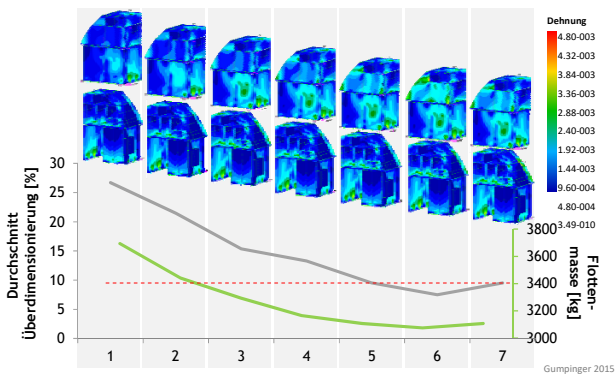


BILD 11. Kompensation vereinzelter Überdimensionierung durch Reduktion des Flottengewichts nach [11]

Ein weiterer methodischer Ansatz berücksichtigt die dynamische Auslegung von Leichtbauproduktfamilien (BILD 12). Die Besonderheit der Vorgehensweise liegt darin, dass die modulare Produktstruktur in eine dynamische Substruktur, die für die FEM-Modellierung notwendig ist, direkt überführt wird. Für die einzelnen Module werden entweder FEM-Simulationen oder auch Tests durchgeführt, um die Frequenzantwortfunktionen zu ermitteln. In einem Gesamtmodell werden diese Informationen je nach gewünschter Produktvariante entsprechend aus den Modulen bzw. Substrukturen konfiguriert. So sind zwar am Anfang eine Reihe von Modulberechnungen oder Tests erforderlich, aber diese können dann bei mehreren Produktvarianten wiederverwendet werden. Neue Module können einfach auf dem gleichen Weg ergänzt werden, ohne eine Vielzahl von notwendigen Tests erneut durchführen zu müssen [12].

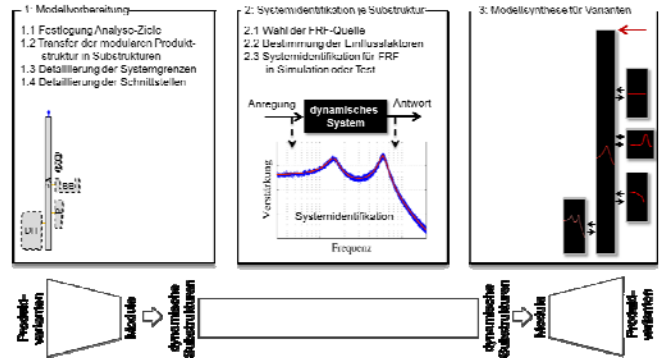


BILD 12. Konzept der Kopplung von modularer Produktstruktur mit der dynamischen Substruktur [12]

Die Herausforderung dieses Ansatzes besteht in der genauen Spezifikation der Modulschnittstellen für die Modellierung der Substruktur. Am Beispiel der Galley wird in BILD 13 gezeigt, dass mit der neuen Methode nicht nur der Aufwand reduziert werden kann, sondern auch eine deutlich bessere Vorhersage gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise (IST) erreicht wird. In dem Beispiel wird die Galleystruktur als Plattform für das FEM-Modell übernommen ohne die Ausstattungsmodule. Die Systemidentifikation der Ofen-Module wurde durch Tests ermittelt und in das Substrukturmodell integriert. Als Verifikation wurde die so ausgestattete Galley insgesamt getestet. Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung mit dem dynamischen Substrukturmodell erzielt werden, wie aus dem Diagramm im BILD 13 oben rechts ersichtlich wird.

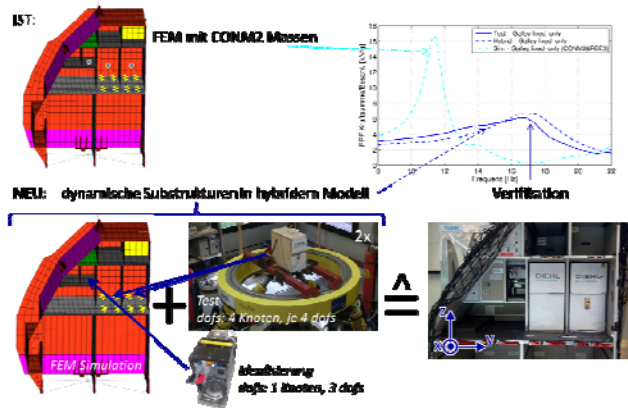


BILD 13. Verifikation des dynamischen Substrukturkonzeptes [12]

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem Artikel wurde vorgestellt, welche Leichtbau-Potenziale in der Entwicklung von Kabinenmonumenten durch verschiedene methodische Ansätze möglich sind. Dies hängt an der Besonderheit von Kabinenelementen, da diese meist aus Sandwichkonstruktionen bestehen und durch die Kunden bedingt einer gewissen Produktvielfalt unterliegen, die sonst so im Flugzeugbau nicht gegeben ist. Mit den vorgestellten Ansätzen zum virtuellen Testen

und dem gezielten Einbau von Dämpfungselementen können bei Sandwichstrukturen und deren Integration in den Flugzeugrumpf weitere Leichtbaupotentiale erschlossen werden.

Für die kombinierte Betrachtung der Produktvielfalt und des Leichtbaus konnten mit dem methodischen Ansatz des Modul-Leichtbaus neue Wege aufgezeigt werden, die das Spannungsfeld zwischen einer modularen Bauweise und von Leichtbau-Bauweisen geschickt auflöst, in dem der Fokus nicht auf ein einzelnes Produkt sondern auf die gesamte Produktfamilie gelegt wird.

## 6. LITERATUR

- [1] Composite Materials Handbook. Volume 3: Polymer Matrix Composites. Materials Usage, Design and Analysis" (MIL-HDBK-17-3F), Washington DC, Department of Defense, 2002.
- [2] Seemann, R.; Krause, D.: Virtual testing of Nomex honeycomb sandwich panel inserts, 20th International Conference on Composite Materials (ICCM20), Copenhagen (2015).
- [3] Schillo, C.; Röstermundt, D.; Krause, D.: Experimental and numerical study on the influence of imperfections of the buckling load of unstiffened CFRP shells, Composite Structures 131 (2015), pp. 128-138.
- [4] Chen, Y.; Seemann, R.; Krause, D.; Tay, T.E.; Tan, V.B.C.: Prototyping and testing of composite riser joints for deepwater application. Journal of Reinforced Plastics & Composites (2015) DOI: 10.1177/0731684415607392.
- [5] Seemann, R.; Plaumann, B.; Oltmann, J.; Krause, D.: FE-Modelling guidelines for the dimensioning of aircraft cabin interior under stationary dynamic loading. 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), St. Petersburg (2014).
- [6] Plaumann, B.; Krause, D.: Methodical Support for the Dimensioning of Variant Lightweight Structures Under Dynamic Excitations. 13th International Design Conference - Design 2014, Dubrovnik (2014), pp. 1167 - 1177.
- [7] Oltmann, J., Seemann, R., Krause, D.: Experimental Investigation on Damping for Honeycomb Sandwich Panel under Different Support Conditions, 5th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST), Hamburg (2015), pp. 207-216.
- [8] Bruchmüller T., Mangold M., Matthiesen S., Oltmann J., Rasmussen O., Krause D., Stücheli M., Meboldt M.: An Adjustable Impedance Element – System Requirements and Design Approach, Design for X, Beiträge zum 26. DfX-Symposium, München (2015), pp. 133-144.
- [9] Krause, D.; Beckmann, G.; Eilmus, S.; Gebhardt, N.; Jonas, H.; Rettberg, R.: Integrated Development of Modular Product Families: A Methods Toolkit. In: Simpson, T.W., Jiao, J., Siddique, Z., Hölttä-Otto, K. (Eds.), Advances in product family and product platform design, ISBN 1461479363, Springer New York (2014), pp. 245–269.
- [10] Krause, D., Kipp, T., Bleeß, C.: Modulare Produktstrukturierung. Handbuch Konstruktion, Hanser, München (2012), pp. 657-678.
- [11] Gumpinger, T.: Modulleichtbau - Methodische Unterstützung des Leichtbaus modularer Produktfamilien, Dissertation, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, TuTech Verlag, 2015.
- [12] Plaumann, B.: Systemanalyse und -synthese für die Auslegung varianter Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten, Dissertation, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, TuTech Verlag, 2015.