

Ansatz zur lastpfadoptimierten Gestaltung von Sandwichstrukturen mithilfe virtueller Tests und realitätsnahen Testaufbauten

Approach for load path optimized design of sandwich structures using virtual tests and realistic test setups

Johann Schwenke^{1,*}, Lukas Schwan¹, Michael Hanna¹, Dieter Krause¹

¹ Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design (PKT), Hamburg University of Technology (TUHH), Germany

* Korrespondierender Autor:
Johann Schwenke
Technische Universität Hamburg (TUHH)
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)
Denickestraße 17
D - 21073 Hamburg
☎ +49 40 / 42878 3625
✉ johann.schwenke@tuhh.de

Abstract

The design of sandwich structures is challenging due to the large number of constituents and materials used. Existing design approaches do not include the consideration of the occurring initial damage as well as application-oriented boundary conditions in testing and optimization. Therefore, a general approach to the design optimization is presented consisting of the four parts problem definition, physical test, virtual test and design optimization, as well as an initialization phase and subsequent iterations. An exemplary application is performed for the novel design concept of optimizing the geometry of the core filling. From the initial results, the potential of the new design approach becomes clear, which can be used as a basis for the design optimization of any sandwich structures.

Keywords

Sandwich Design, Sandwich Optimization, Virtual Testing, Test Setups, Inserts

1. Einleitung

Im Mobilitätssektor hat die Masse eines Produktes einen direkten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch und die damit verbundenen Emissionen [1]. Um die Sekundärstruktur von Flugzeugen daher möglichst leicht zu gestalten, werden in der Flugzeugkabine Sandwichstrukturen eingesetzt, da diese sehr gute gewichtsspezifische Materialeigenschaften aufweisen [2-4]. Durch die Vielzahl an Konstituenten, deren geometrischen Ausprägungen und eingesetzten Materialien entsteht eine hohe kombinatorische Vielfalt, welche in der Auslegung berücksichtigt werden muss. Um neben dem reinen Materialleichtbau zusätzliches Gewicht einzusparen, ist eine Gewichtsoptimierung der Sandwichstruktur inklusive ihrer Lasteinleitungselemente im Sinne des Strukturleichtbaus auf den spezifischen Anwendungsfall erforderlich. Hierbei kann zwischen der Optimierung des lokalen und globalen Strukturverhaltens unterschieden werden, wobei die Lastein- und Weiterleitung zentrale Rollen einnehmen. Voraussetzung für die Gestaltungsoptimierungen sind neben numerischen Modellen zur Optimierung und zum virtuellen Testen auch entsprechende Testaufbauten, deren Randbedingungen aus der realen Anwendung abstrahiert werden müssen, um hohe Sicherheitsfaktoren zu vermeiden.

2. Stand der Technik

Sandwichstrukturen bestehen, mit einer Deckschicht, einem Kern sowie einem verklebten Einsatz, aus mehreren Konstituenten, wobei je nach Anwendungsfall unterschiedliche Materialien eingesetzt werden [2]. In der Flugzeugkabine werden für die Deckschichten zumeist Glasfaser-Prepregs eingesetzt, da diese zusätzlich die speziellen Brandschutzanforderungen aus der Luftfahrt erfüllen [2]. Die Deckschichten werden über einen leichten Kern auf Abstand gehalten, wobei zwischen der Struktur des Kerns (bspw. Stab-, Waben-, gefalteter oder kontinuierlicher Kern) und dem eingesetzten Material (u.a. Nomex®, Schaum, 3D Druck Fillament oder Harz) unterschieden werden kann [2]. In Flugzeugkabinenanwendung werden häufig Nomex®-Wabenkerne eingesetzt, welche aufgrund deren Struktur und des anisotropen Materialverhaltens ein komplexeres Strukturverhalten als andere Kerntypen aufweisen. In die Sandwichstruktur werden zur lokalen Lasteinleitung Inserts eingebracht, die mit einer Pottingmasse verklebt werden [4].

Diese Vielzahl an unterschiedlichen Konstituenten, dafür eingesetzte Materialien und geometrische Ausprägungen, wie beispielsweise Kernhöhe, Pottinghöhe oder Anzahl an Deckschichten, führt zu einer hohen kombinatorischen Vielfalt in der Auslegung von Sandwichstrukturen. Failure Mode Maps, wie beispielsweise von Rodríguez-Ramírez et al. [5], ermöglichen die Vorhersage der initial versagenden Konstituente bei Variation verschiedener Auslegungsgrößen. Hierdurch kann die Auslegung und Gestaltung von Insert-Systemen unterstützt werden. Ein entsprechender Ansatz zur Auslegung von Inserts in Form eines Flow-Charts ist im Insert Design Handbook [4] gegeben, wobei hier nur der Radius und die Anzahl an Inserts verändert wird. Im Gegensatz dazu existieren in der Literatur auch Ansätze zur Optimierung der Gestaltung einzelner Konstituenten, insbesondere der Inserts [6-8]. Weiterführend zeigen Schwenke und Krause [9] ein Vorgehen und entsprechende Ergebnisse zur Integration des Lasteinleitungspunktes in den Kern, um lokale Lasten lastpfadgerecht in die Struktur einzubringen. Eine Topologieoptimierung wird hier am 3D-gedruckten Kern durchgeführt und es wird gezeigt, dass die Randbedingungen einen erheblichen Einfluss auf die Optimierungsergebnisse haben und dementsprechend in der Gestaltung und Auslegung von Sandwichstrukturen und deren Konstituenten berücksichtigt werden müssen.

Die Randbedingungen für die Optimierung orientieren sich an der realen Anwendung oder einem entsprechenden physischen Test. Physische Tests sind neben Zertifizierungsgründen erforderlich, um neue Gestaltungskonzepte zu überprüfen. In Flugzeugkabinenanwendungen werden ganze Kabinen-Monumente in aufwändigen Full-Size Tests gemäß den Vorschriften

aus der CS-25 [10] getestet. Die Lasteinleitungselemente werden zusätzlich in entsprechenden Komponenten-Tests getestet, wobei keine Standard-Tests existieren und gemäß den Empfehlungen aus dem Insert Design Handbook [4] getestet wird. Insbesondere der Schub- und Pull-Out Test sind hierbei die auslegungsrelevanten Tests, wobei die Randbedingungen in diesen Tests stark idealisiert werden und nicht den Randbedingungen aus der realen Anwendung entsprechen [11,12]. Erste Ansätze für Testaufbauten mit realitätsnahen Randbedingungen existieren, welche als Grundlage dienen können, um entsprechende Optimierungen durchzuführen, in denen das globale Strukturverhalten und damit die Weiterleitung der Lasten mitberücksichtigt werden kann [13,14].

Da der physische Testaufwand zur Gestaltungsüberprüfung sehr groß ist, werden zunehmend virtuelle Tests basierend auf der Finite-Elemente Methode (FEM) eingesetzt. Hierbei erfolgt eine numerische Nachbildung der physischen Versuche, womit Entwicklungszeiten und -kosten eingespart werden können [6]. Der Aufbau der virtuellen Modelle erfolgt dabei hierarchisch aufbauend von den Konstituenten bis zur Zielstruktur [6,11,12]. Entsprechende virtuelle Modelle, mit Hilfe derer es möglich ist, das progressive Schädigungsverhalten der Sandwichstrukturen bis zum Komponenten-Level darzustellen, sind in der Literatur beschrieben [14-17]. Eine Erweiterung der detaillierten Modelle auf höhere strukturelle Komplexitätsebenen unter Berücksichtigung des globalen Strukturverhaltens ist in der Literatur nicht beschrieben, jedoch zeigen Hanna et al. [18] einen ersten Ansatz, um die detaillierten Modelle sowie Tests mit realitätsnahen Randbedingungen in die Sandwichoptimierung miteinzubeziehen.

3. Problemstellung und Forschungsvorhaben

Im Stand der Technik wurde dargelegt, dass Ansätze und Ergebnisse zur Sandwichoptimierung und Sandwichgestaltung existieren. Auch ein Ansatz, welcher anwendungsnahe Testaufbauten und detaillierte virtuelle Modell in die Optimierung miteinbezieht, wird in der Literatur beschrieben [18]. Dennoch wird bei den Ansätzen und Gestaltungskonzepten zumeist nur eine einzelne Konstituente optimiert, ohne Betrachtung der anwendungsspezifischen Randbedingungen und des eingesetzten Panels, in welchem je nach Aufbau unterschiedliche Versagensmechanismen auftreten können. Dies kann dazu führen, dass die Optimierung nicht die erwünschten Auswirkungen haben, da die initial versagende und damit kritische Konstituente von den Gestaltungsänderungen nicht betroffen ist und ein Versagen durch die Optimierungen unter Umständen nicht herausgezögert wird.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur lastpfadoptimierten Gestaltung von Lasteinleitungselementen in Sandwichstrukturen unter Einbeziehung virtueller Tests vorgestellt. Dieser baut auf den Vorarbeiten des Institutes für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) sowie der Autoren auf und fasst Ansätze für unterschiedliche Sandwichstrukturen zusammen und erweitert es zu einem allgemeinen Ansatz, der für alle Arten von Sandwichstrukturen geeignet ist.

4. Ansatz zur lastpfadoptimierten Gestaltung von Sandwichstrukturen

In diesem Kapitel wird der Gestaltungsansatz vorgestellt, welcher in Abbildung 1 dargestellt ist. Der Ansatz gliedert sich in die vier Hauptbereiche *Problemstellung*, *Physischer Test*, *Virtueller Test* und *Gestaltungsoptimierung* sowie unterschiedliche Phasen. Die Grundidee des Ansatzes ist, dass ausgehend von der Problemstellung in der Initialisierungsphase zunächst ein geeignetes physisches Testmodell ausgewählt bzw. entwickelt wird. Für diesen Testaufbau wird ein virtuelles Testmodell aufgebaut, welches die auslegungsrelevanten Versagensmechanismen abbildet. Zusätzlich wird ein Optimierungsmodell aufgebaut, mit Hilfe dessen Gestaltungsalternativen für die Lasteinleitung ermittelt werden. Diese werden anschließend im virtuellen Testmodell miteinander verglichen, wonach die beste Alternative

ausgewählt und physisch getestet wird. Erfüllt das ermittelte Gestaltungskonzept die Abbruchkriterien noch nicht, wird dieser Ablauf so lange iterativ durchgeführt und die Modelle ggf. angepasst, bis eines der Abbruchkriterien erfüllt und ein geeignetes Design gefunden ist.

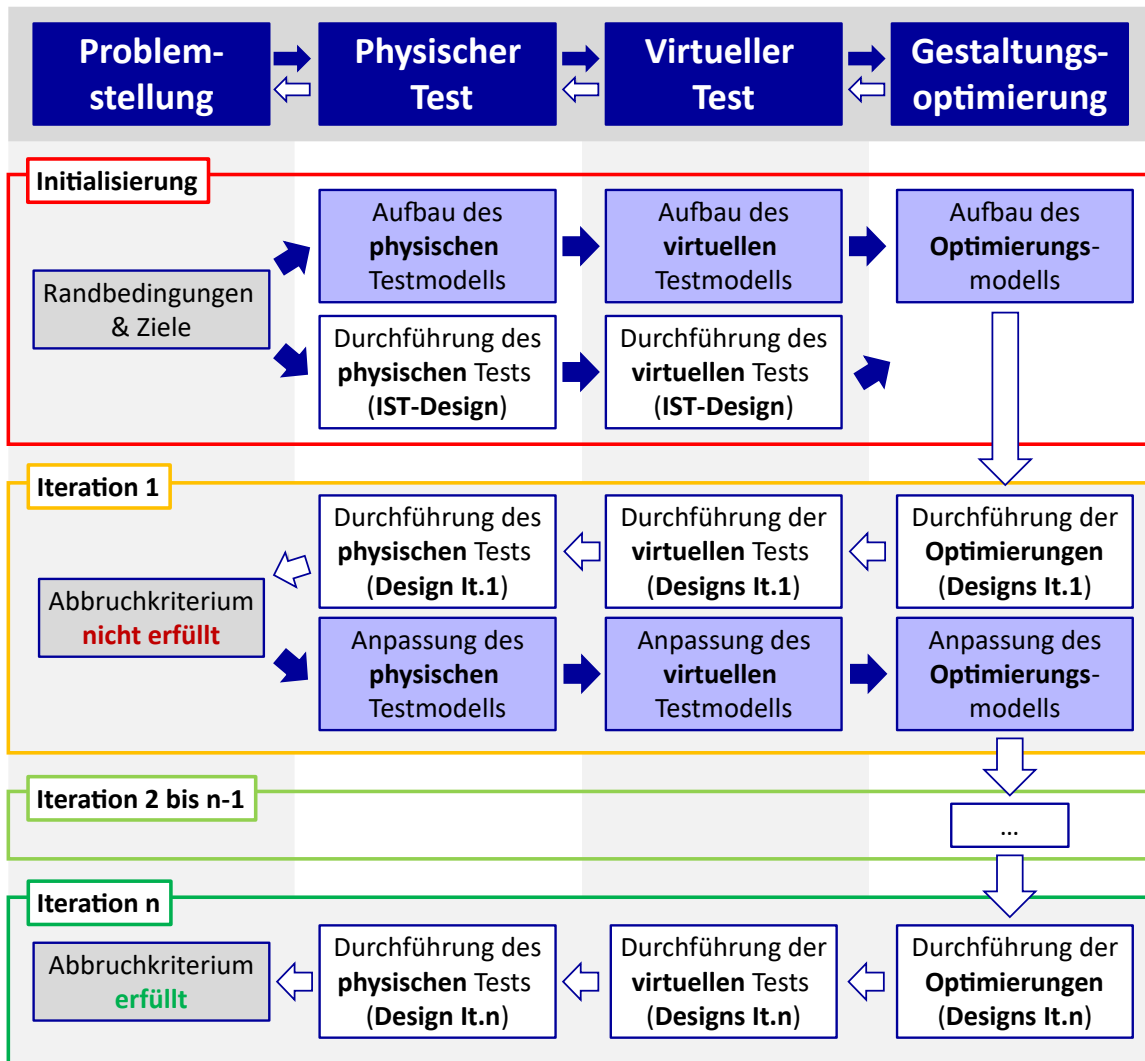


Abbildung 1: Ansatz zur lastpfadoptimierten Gestaltung von Sandwichstrukturen

4.1. Initialisierungsphase

Im Folgenden werden die Schritte der Initialisierungsphase ausführlich beschrieben.

4.1.1. Problemstellung

In diesem Schritt werden die Randbedingungen definiert und die Ziele festgelegt. Bei der Definition des IST-Designs werden alle einzelnen Konstituenten und der Sandwichverbund festgelegt. Dazu gehören die eingesetzten Materialien, die Art des Kerns sowie die Geometrie. Aus der Anwendung wird der zu untersuchende Lastfall und die Lagerungsrandbedingungen abgeleitet. Des Weiteren werden die Optimierungsziele (bspw. Erhöhung der Festigkeit, Steifigkeit oder Verringerung der Durchbiegung, Gewicht) festgelegt und die Entscheidung getroffen, ob die Weiterleitung der Lasten, also ein globales Design, oder eine lokale Optimierung der Lasteinleitung betrachtet wird. Bei letzterer kann zwischen einer individuellen Optimierung der einzelnen Lasteinleitungspunkte und einer Optimierung für ein standardisiertes Konzept, das an verschiedenen Stellen eingesetzt werden kann, unterschieden werden.

4.1.2. Physischer Test

In diesem Schritt erfolgt zunächst die Auswahl eines geeigneten Testaufbaus gemäß der Anwendung und des betrachteten Lastfalls. Dabei können bestehende Standardtests, wie der Pull-Out Test [4], verwendet werden. Meist werden die Randbedingungen in diesen Tests zwar zu stark abstrahiert, um Gestaltungsoptimierung sinnvoll durchzuführen [9], die Ergebnisse können aber als Datengrundlage dienen, um ein virtuelles Testmodell stufenweise nach der Produkt-Komponenten-Testpyramide (PKT-Pyramide) [11,12] aufzubauen, das Potential von Gestaltungsänderungen aufzuzeigen und eine Basis für den finalen physischen Testaufbau zu bilden. Hartwich et al. [13] zeigen, wie aus der realen Anwendung ein geeigneter Testaufbau für Sandwichstrukturen abgeleitet werden kann. Zur Validierung des virtuellen Modells und als Referenz für spätere Tests erfolgt die initiale Durchführung mit dem IST-Design.

4.1.3. Virtueller Test

In diesem Schritt erfolgt der Aufbau des virtuellen Modells für das IST-Design, welches den physischen Test und das darin auftretende Versagen abbildet. Das virtuelle Modell wird zunächst hierarchisch aufgebaut und anschließend auf den ausgewählten Test erweitert und validiert [6,12]. Gegebenenfalls ist an dieser Stelle bereits die Implementierung weiterer Versagensmechanismen der einzelnen Konstituenten oder Kontakte sinnvoll, da diese nach der Optimierung versagenskritisch werden können. Weiterhin können auch variable Auslegungsgrößen, wie beispielsweise unterschiedliche Anzahl an Deckschichten oder variierende Sandwichdicken, mitbetrachtet werden, um somit mehrere ähnliche Sandwichstrukturen mit einem Modell abbilden und betrachten zu können. Die Abbildung aller relevanten Versagensmechanismen in Kombination mit der Variation spezifischer Auslegungsgrößen ermöglicht dann zusätzlich die Ermittlung von Failure Mode Maps.

4.1.4. Gestaltungsoptimierung

Aus den Ergebnissen der physischen und virtuellen Tests können die kritischen Konstituenten und Bereiche identifiziert werden, in denen das Versagen auftritt. Ziel der Gestaltungsoptimierung ist es, das Versagen hinauszuzögern, sodass im Idealfall das Versagen mehrerer Konstituenten bzw. Kontakte gleichzeitig auftritt. Dazu erfolgt zunächst die Betrachtung der Gestaltungsmöglichkeiten für die kritischen Bereiche. Dies können bspw. eine lokale Anpassung der Deckschicht, eine Veränderung der Insertgröße oder eine Anpassung des Kerns etc. sein. Je nach Zielen und betrachteter Sandwichstruktur kann es sinnvoll sein, entweder lokal das Insert, die Einsätze, das Potting sowie die Kernfüllmasse oder global den Kern und die Deckschicht zu betrachten. Beim Aufbau des Optimierungsmodells kann ein vereinfachtes numerisches Modell aufgebaut oder das vorhandene virtuelle Modell zunächst abstrahiert und anschließend eine Optimierung implementiert werden. Dies dient zur Einsparung von Rechenzeit, da meist mehrere Iterationen in der Optimierung notwendig sind und währenddessen nicht alle Versagensmechanismen berücksichtigt werden können.

4.2. Iterationsphase

Nach Abschluss der Initialisierungsphase folgt die Iterationsphase.

4.2.1. Durchführung der Optimierungen und Tests

Auf Grundlage des Optimierungsmodells werden zunächst Optimierungen durchgeführt, wobei mehrere Gestaltungsalternativen abgeleitet werden. Mithilfe des detaillierten virtuellen Modells werden diese Gestaltungsalternativen anschließend virtuell überprüft. Anhand der Ergebnisse aus der numerischen Simulation erfolgt eine erste Entscheidung für eine

Gestaltungsalternative oder -konzept, welches weiterverfolgt und physisch getestet wird. Durch die Vorselektierung mithilfe des virtuellen Modells kann der Ressourceneinsatz für die teilweise sehr aufwändigen physischen Tests deutlich reduziert werden. Dennoch sind abschließend physische Tests erforderlich, um Modellierungsfehler und nicht implementierte Versagensmechanismen im virtuellen Modell ausschließen zu können.

4.2.2. Überprüfung der Abbruchkriterien

Die Ergebnisse aus den physischen Tests werden analysiert und bewertet. Dazu werden Abbruchkriterien herangezogen, welche sich an den zuvor definierten Zielgrößen orientieren. Diese können mechanische Eigenschaften sein, wie beispielsweise eine geforderte Festigkeit, Steifigkeit sowie minimale Durchbiegung oder Masse der Struktur, aber sich auch am Aufwand orientieren. Beispielsweise kann eine festgelegte Anzahl an Iterationen oder Dauer erreicht sein oder nur noch geringe Verbesserung zum vorherigen Design auftreten. Ist ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt, endet die Iterationsphase und das finale Design wird festgelegt. Falls keines der Abbruchkriterien erfüllt ist, erfolgen weitere Iterationsschleifen.

4.2.3. Anpassung der Modelle

Im Falle weiterer Iterationsschleifen erfolgen die Anpassungen an den entsprechenden Modellen. In einem ersten Schritt wird dabei der Testaufbau überprüft, wobei in diesem Schritt auch ein neuer Testaufbau ausgewählt oder entwickelt werden kann, um die angestrebte Stufe der PKT-Pyramide zu erreichen. Anschließend wird überprüft, ob eine Anpassung des virtuellen Modells und des Optimierungsmodells erforderlich ist. Beispielsweise kann eine Erweiterung auf einen neuen Testaufbau oder die Implementierung weiterer Versagensmechanismen nötig sein. Wurden die Anpassungen durchgeführt, wiederholen sich die Schritte ab Kapitel 4.2.1 bis das endgültige Design erreicht ist.

4.3. Anmerkung zum Ansatz

Der vorgestellte Ansatz soll als Orientierung bei der Optimierung von Sandwichstrukturen dienen. Daher müssen nicht zwangsläufig alle Schritte durchlaufen und die exakte Reihenfolge eingehalten werden. Neue Erkenntnisse können zu Iterationsschleifen und Sprüngen zwischen den Phasen führen. Weiterhin ist die Verwendung eines virtuellen Modells nicht zwangsläufig notwendig, da meist die physischen Tests auslegungsrelevant sind. Deren Einsatz kann aber den Test- und Entwicklungsaufwand deutlich reduzieren. Zusätzlich müssen neue Designvorschläge nicht unbedingt in einer numerischen Optimierung ermittelt werden, bevor sie im virtuellen Modell überprüft werden. Die Qualität der erreichten Ergebnisse hängt allerdings von den definierten Zielen und dem eingesetzten Modellierungsaufwand ab.

5. Anwendung des Ansatzes

Im Folgenden werden die Anwendung des Ansatzes beispielhaft gezeigt sowie erste durch Anwendung des Ansatzes erzielte Ergebnisse vorgestellt.

5.1. Problembeschreibung und virtueller Modellaufbau

Für das Anwendungsbeispiel soll die Gestaltung eines Lasteinleitungselements in einer Flugzeug-Trennwand beispielhaft optimiert werden. Die Zugbelastung ist dabei auslegungskritisch, wobei die Gestaltung an einem anwendungsnahen Testaufbau überprüft werden soll. Das betrachtete Sandwichpanel (12 oder 20 mm Höhe) besteht aus einem Nomex®-Wabenkern (ABS5035-A4) mit zwei Glasfaser-Prepregs (ABS5047-07) und einem

Standard-Insert (SL607-3-6S), welches mit Pottingmasse (Scotch-Weld 9323) fully-potted in der Struktur verklebt ist. Das Ziel der Gestaltungsoptimierung ist es, die mechanischen Eigenschaften des Inserts-Systems bei gleichbleibender Masse zu erhöhen.

Am Pull-Out Tests (Durchmesser 70 mm) werden erste physische Tests durchgeführt, wobei das auftretende Initialversagen das Schubbeulen des Kerns ist. Aufbauend auf den Materialmodellen und Modellierungsvorgehen nach Seemann [6] und Schwan et al. [14] wird ein entsprechendes Modell aufgebaut. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt.

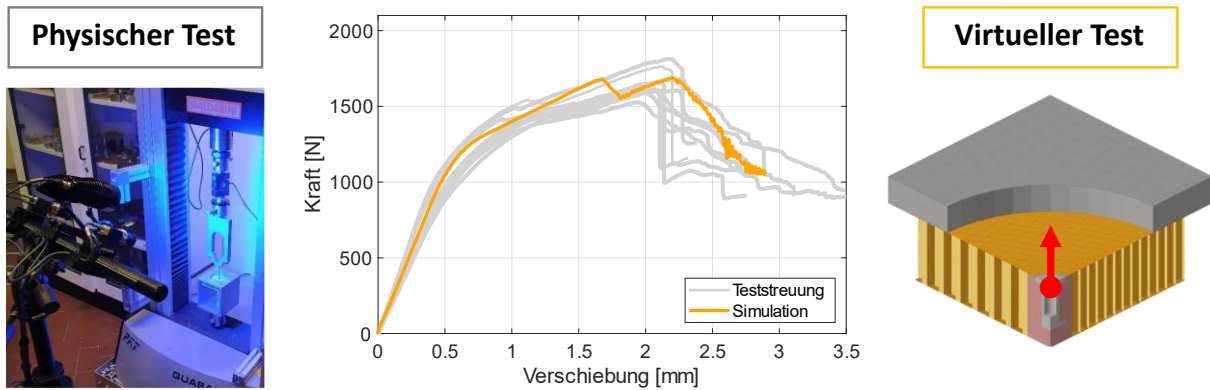


Abbildung 2: Experimentelle und numerische Ergebnisse des IST-Designs im Pull-Out Test

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, stimmt der Kraft-Wegverlauf aus dem physischen Test gut mit dem virtuellen Modell überein. Auch der auftretende Schaden, das Schubbeulen des Kerns wird abgebildet. Entsprechend müssen geeignete Gestaltungsmöglichkeiten identifiziert werden, um dieses Versagen hinauszuzögern.

5.2. Auswahl und Anwendung eines Gestaltungskonzepts

Je nach Art und Ort des Versagens kommen zur Gestaltungsoptimierung unterschiedliche Konstituenten und Möglichkeiten in Betracht, die die Gestalt zu optimieren, die über eine bloße Materialanpassungen oder Parameteroptimierung der globalen Sandwichstruktur hinausgehen. In Abbildung 3 sind verschiedene Konzepte beispielhaft für eine Sandwichstruktur mit einem Wabenkern und einem Lasteinleitungspunkt dargestellt.

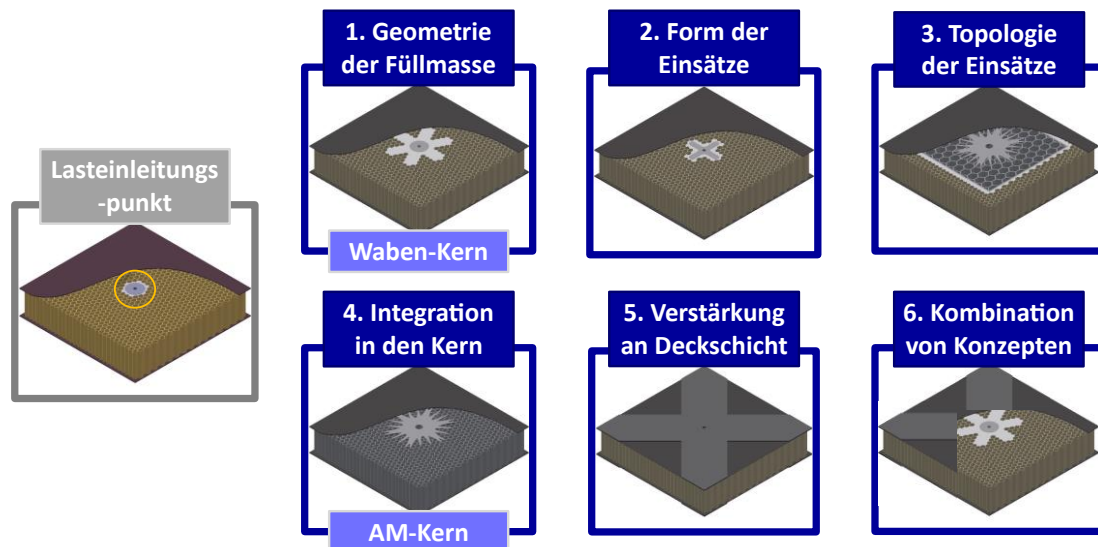


Abbildung 3: Übersicht über verschiedene Gestaltungskonzepte für einen Lasteinleitungspunkt

Erstens kann eine gezielte Anpassung der eingebrachten Füllmasse erfolgen, wobei zwischen der vor dem Verpressen eingebrachten Kernfüllmasse oder der zum nachträglichen Verkleben verwendeten Pottingmasse unterschieden werden kann. Zweitens besteht die Möglichkeit einer Optimierung der Form der Einsätze (Insert oder Hartgewebeblöcke), wie bspw. Schwenke et al. [19] es für ein Insert mit konstantem Querschnitt in einem Schaumkern gezeigt haben. Hierbei ist auch eine Anwendung auf andere Kernarten und eine dreidimensionale Optimierung möglich. Drittens kann zusätzlich die Topologie der Einsätze optimiert werden [9]. Viertens ist eine direkte lastpfadoptimierte Integration in den Kern bspw. durch additiv gefertigte Sandwichstrukturen möglich [9]. Fünftens kann die Deckschicht zum Beispiel durch lokale Patches oder lokale Aufdopplung der Lagen, die entweder außen oder innen aufgebracht werden, verstärkt werden. Sechstens besteht die Möglichkeit, die vorher genannten Ansätze zu kombinieren bzw. durch das Hinzufügen einer zusätzlichen Verstärkungsconstituenten (mit ggf. eigenem Material) umzusetzen, die die Sandwichstruktur zwischen Kern und Deckschicht verstärkt und die lokal eingeleiteten Lasten großflächiger überträgt, bspw. durch ein Stabwerk aus CFK.

Wichtig bei der Betrachtung der Gestaltungskonzepte ist, dass die Produktion rechtzeitig berücksichtigt wird, um Fertigungs- und Montageaufwände zu begrenzen und die erzeugten Hohlräume zur Gewichtseinsparung nicht nachträglich durch Klebmassen aufzufüllen.

In diesem Beitrag wird der neuartige Gestaltungsansatz untersucht, die Geometrie der Füllmasse anzupassen, in diesem Fall die der nachträglich eingebrachte Pottingmasse. Da der Gestaltungsansatz bisher noch nicht untersucht wurde, wird zunächst auf den Aufbau eines Optimierungsmodells verzichtet, sondern das Potential mit Hilfe eines ausgewählten Designs im Vergleich zu einer Referenzprobe untersucht. Der neue sternförmige Designvorschlag wurde aus vorhandenen Ergebnissen für die Gestaltungsansätze *Form der Einsätze* und *Integration in den Kern* [9,19] abgeleitet und besitzt sechs Verstrebungen. Als Referenz wird die typische kreisrunde Form durch ein Sechseck angenähert. Dies ermöglicht, durch die gleiche Anzahl an gefüllten Waben, die gleiche Masse bei allen Proben. Während der Fertigung der beiden in Abbildung 4 dargestellten Designs wurden entsprechende Ausschnitte in die Sandwichproben gefräst und in diesen das Insert mittig verklebt.

5.3. Testen des neuen Gestaltungsansatzes

In Abbildung 4 ist neben den Ergebnissen des physischen Tests ebenfalls die Implementierung der Designs in das virtuelle Testmodell gezeigt. Auf eine Darstellung der Ergebnisse der virtuellen Tests wird an dieser Stelle verzichtet, da das später bei den optimierten Proben auftretende Pottingversagen noch nicht implementiert war und dies in der nächsten Iterationsschleife erfolgen muss.

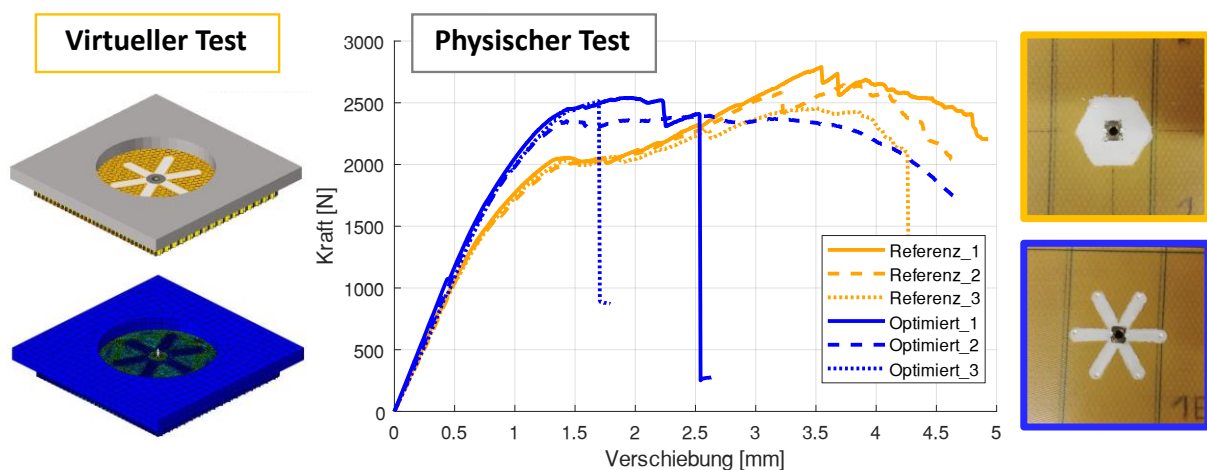


Abbildung 4: Virtuelles Modell und Testergebnisse des Gestaltungskonzeptes „Geometrie der Füllmasse“

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, weisen alle Proben zu Beginn eine sehr ähnliche Steifigkeit auf. Ein späteres Abflachen der Kurve für die optimierten Proben deuten auf eine erhöhte Festigkeit hin. Das initiale Versagen bei beiden Probendesigns ist das Schubbeulen der Zellwände, jedoch tritt bei zwei von drei der optimierten Proben kurz darauf ein komplettes Versagen des Pottings in Form eine Scherbruches auf. Daher sind die maximal erreichten Kräfte der Referenzproben höher, allerdings werden diese erst deutlich nach dem initialen Versagen erreicht und sind daher nicht mehr relevant. Bei einer Durchbiegung von 1,5 mm (Bereich in dem die Kraft aller Proben stagniert) erreichen die optimierten Proben durchschnittlich eine um 20 % höhere Kraft als die Referenzproben.

5.4. Bewertung des Gestaltungskonzepts und Modell-Anpassungen

Die Ergebnisse des Pull-Out Tests zeigen das hohe Potential des Gestaltungskonzepts, da durch das sternförmige Konzept, die mechanischen Eigenschaften verbessert werden können, ohne die Masse zu erhöhen. Es muss nun noch auf höheren strukturellen Komplexitätsebenen mit anwendungsnahen Randbedingungen überprüft werden, ob das neue Design die Ziele erfüllt. Zur Überprüfung wird der Testaufbau von Hartwich et al. [13] vorgeschlagen, bei welchem die Sandwichstruktur über weitere Lasteinleitungselemente gelagert wird. Der Testaufbau sowie das erweiterte virtuelle Modell mit entsprechenden Ergebnissen für ein Referenzdesign sind in Abbildung 5 dargestellt.

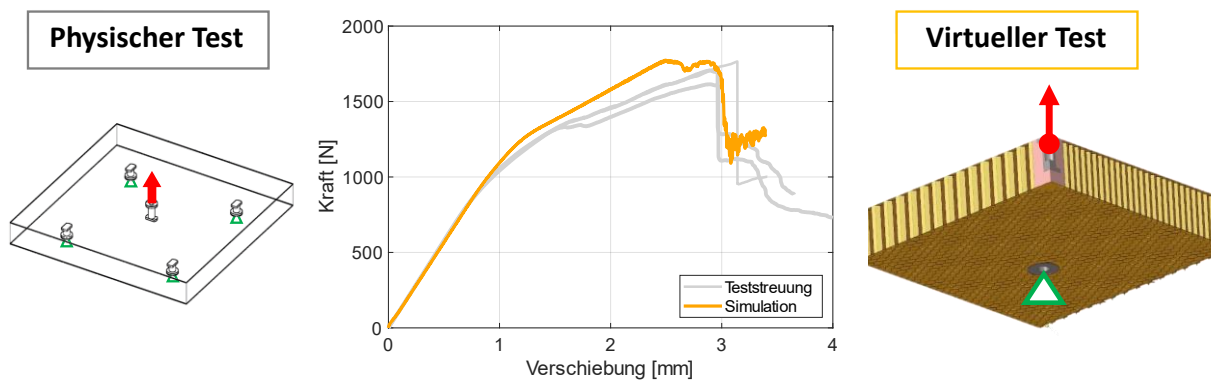


Abbildung 5: Experimentelle und numerische Ergebnisse des Referenzdesigns im anwendungsnahen Test

Auch bei diesem Versuch ist das Schubbeulen des Kerns der initiale Schädigungsmechanismus, jedoch werden bei Auswertung des virtuellen Modells Unterschiede hinsichtlich der Schubspannungsverteilung in den Zellwänden im Vergleich um einfachen Pull-Out Test ersichtlich.

Zur Optimierung der Füllmassengeometrie wird eine modifizierte Topologieoptimierung verwendet. Dazu werden alle Elemente einer einzelnen Wabe oder bei Ausnutzung von Symmetrien mehrerer Waben zu einem Set zusammengefasst und nach festgelegter Anzahl an Iterationen die gemittelte Elementdichte für das jeweilige Set bestimmt. Alle Waben werden dann nach der gemittelten Dichte sortiert und anschließend können entweder die Waben mit der höchsten gemittelten Dichte in das Design übernommen oder die Waben mit der niedrigsten Elementdichte aus dem Designraum entfernt werden. Um mehrere Alternativen zu ermitteln, kann dieses Vorgehen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Wiederholungen durchgeführt werden, in dem entweder der Designraum sukzessive verkleinert wird oder immer mehr gefüllte Waben in das Design aufgenommen werden und daraufhin für den neu definierten Designraum die Topologieoptimierung wiederholt wird. Die ermittelten Alternativen werden anschließend in einem genauen Versagensmodell virtuell getestet, um abschließend die sinnvollste Verteilung der Füllmasse zu bestimmen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein allgemeingültiger Ansatz zur Gestaltungsoptimierung von Sandwichstrukturen vorgestellt. Dabei wurden die Hauptbereiche *Problemstellung*, *Physischer Test*, *Virtueller Test* und *Gestaltungsoptimierung* in der *Initialisierungs-* und den anschließenden *Iterationsphasen* beschrieben. Daraufhin erfolgte die Anwendung des Ansatzes auf das neuartige Gestaltungskonzept der Optimierung der Geometrie der Füllmasse. Dazu wurden virtuelle Modelle für einen realitätsnahen physischen Test aufgebaut. Aus den ersten Ergebnissen wird das Potential des Gestaltungsansatzes deutlich. Durch die weitere Anpassung der Modelle und die Implementierung des Vorgehens zur numerischen Optimierung der Position gefüllter Waben, wird zukünftig angestrebt, die Ergebnisse in die Anwendung zu übertragen. Der Ansatz und die vorgestellten Gestaltungskonzepte können somit als Grundlage für die Gestaltungsoptimierung beliebiger Sandwichstrukturen dienen.

Acknowledgements

Teile des Beitrags wurden in den LuFo VI-1 Projekten EFFEKT und CabinJoint erarbeitet, die durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Krause, Dieter et al.: Leichtbau. In: Rieg, Frank; Steinhilper, Rolf (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München: Carl Hanser Verlag, 2018, S. 487-507.
- [2] Zenkert, Dan: The handbook of sandwich construction. Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997.
- [3] Bitzer, Tom: Honeycomb technology - Materials, design, manufacturing, applications and testing. London, New York: Chapman & Hall, 1997.
- [4] ESA Requirements and Standards Division: Space Engineering: Insert design handbook. 2011.
- [5] Rodríguez-Ramírez, Juan de Dios; Castanié, Bruno; Bouvet, Christophe: Insert of sandwich panels sizing through a failure mode map. In: Composite Structures 234 (2020), 111724.
- [6] Seemann, Ralf: A Virtual Testing Approach for Honeycomb Sandwich Panel Joints in Aircraft Interior. Berlin: Springer Vieweg, 2020.
- [7] Qi, Ge et al.: Characteristics of an improved boundary insert for sandwich panels with lattice truss cores. In: Aerospace Science and Technology 107 (2020), 106278.
- [8] Lim, Jun Woo; Lee, Dai Gil: Development of the hybrid insert for composite sandwich satellite structures. In: Composites: Part A 42 (2011), S. 1040-1048.
- [9] Schwenke, Johann; Krause, Dieter: Optimization of load introduction points in sandwich structures with additively manufactured cores. In: Design Science 6 (2020), Nr. 13.
- [10] European Aviation Safety Agency, 2007. Certification Specifications for Large Aeroplanes CS-25.
- [11] Heyden, Emil et al.: Transferability of Boundary Conditions in Testing and Validation of Lightweight Structures. In: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, Jesteburg, 2019.
- [12] Schwan, Lukas et al: Procedure for the transferability of application-specific boundary conditions for the testing of components and products. In: Proceedings of the 32th Symposium Design for X, Tutzing, 2021.
- [13] Hartwich, Tobias Simeon et al.: Classification and Development of New Component Tests for Aircraft Cabin Interior. In: Proceeding of the 20th European Conference on Composite Materials, Lausanne, Schweiz, 2022.
- [14] Schwan, Lukas et al.: Virtual Testing of Honeycomb Sandwich Structures with Multiple Load Introduction Points. In: Proceeding of the 20th European Conference on Composite Materials, Lausanne, Schweiz, 2022.
- [15] Seemann, Ralf; Krause, Dieter: Numerical modelling of partially potted inserts in honeycomb sandwich panels under pull-out loading. In: Composite Structures (2018), Nr. 203, S. 101–109.
- [16] Roy, Rene et al.: Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels with bolt insert. In: Composites: Part B 56 (2014), S. 762-769.
- [17] Heimbs, Sebastian; Pein, Marc: Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts. In: Composite Structures (2009), Nr. 89; S. 575–588.
- [18] Hanna, Michael et al.: Methodical Approach for the Model-Based Development of Aircraft Cabin Product Families under Consideration of Lightweight and Cost-Based Design. In: Proceedings of the Design Society, Volume 2: DESIGN2022, Dubrovnik, Kroatien, 2022.
- [19] Schwenke Johann, Hartwich Tobias, Krause Dieter: Optimierung von Inserts in Sandwichstrukturen durch additive Fertigung. In: Lachmayer Roland, Lippert Rene, Kaielerle Stefan (Hrsg.): Konstruktion für die Additive Fertigung 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020, S. 243-259.