

Entwicklung von virtuellen Testverfahren für Sandwichstrukturen

Ralf Seemann und Dieter Krause
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT);
Technische Universität Hamburg-Harburg*

Abstract

The prediction of the mechanical properties of structural elements using advanced finite element analysis is an important part of the product development process of light weight structures. In this context, the term virtual testing has been established. This term refers to a complex system of hierarchical models, structural tests and analysis methods with the objective of ensuring the fidelity of the simulation. The present contribution introduces an approach for developing virtual test methods for sandwich structures using the example of potted honeycomb sandwich inserts.

Keywords: virtual testing, honeycomb sandwich, sandwich insert, FEA

1 Einleitung

In der Produktentwicklung stellt der durchgehende Einsatz von rechnergestützten Werkzeugen eine Möglichkeit dar, Kosten und Entwicklungszeit zu reduzieren und gleichzeitig die Produktqualität zu erhöhen. Ein Hauptziel dieses virtuellen Produktentwicklungsprozesses (PEP) ist die Analyse der späteren Produkteigenschaften in frühen Entwicklungsphasen [1]. Im Entwicklungsprozess von Leichtbauprodukten spielt die Analyse der strukturmechanischen Produkteigenschaften eine übergeordnete Rolle. Das komplexe Versagensverhalten der im Leichtbau häufig verwendeten anisotropen Faserkunst-

stoffverbunde (FKV) sowie das Bestreben nach verbesserter Materialausnutzung erfordert kontinuierlich entwicklungsbegleitende Material- und Komponententests. Im Sinne der virtuellen Produktentwicklung ist daher die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von Leichtbau-Strukturelementen durch Simulationsmodelle basierend auf der Finiten Elemente Methode (FEM) wichtiger Bestandteil des PEP. Aus strukturmechanischer Sicht erfordern hierbei die Krafterleitungselemente, z.B. an Fügstellen, aufgrund der hier vorherrschenden komplizierten Spannungszustände spezielle Aufmerksamkeit. Insbesondere FKV-Sandwichstrukturen, deren mechanisch schwacher Kern generell nicht geeignet ist lokal eingeleitete Kräfte adäquat zu übertragen, müssen an Fügstellen daher lokal verstärkt werden, was zu Spannungskonzentrationen und schließlich zum häufigen Versagen an den Verbindungsstellen führt [2]. Im Rahmen dieses Beitrages wird zunächst der Stand der Technik im Bereich Struktursimulation von FKV-Sandwichverbunden sowie virtuelles Testen von Leichtbaustrukturen beschrieben, bevor ein Ansatz für den systematischen Aufbau von virtuellen Testverfahren von Sandwichstrukturen am Beispiel von Sandwichverbindungen mit Honigwabenkern vorgestellt wird.

2 Stand der Forschung

Zur Vorhersage der Struktureigenschaften während des PEP sind anwendungsspezifische virtuelle Testmethoden zur Abbildung des komplizierten Versagensverhaltens von FKV-Sandwichstrukturen notwendig. Im Folgenden wird zunächst der Begriff *virtuelles Testen* eingeführt. Anschließend wird die Modellierung von Sandwichverbunden beschrieben bevor abschließend ein Sandwichinsertsystem als Beispielproblem vorgestellt wird.

2.1 Virtuelles Testen von Leichtbaustrukturen

Im Kontext der Leichtbauproduktentwicklung geht der Begriff *virtuelles Testen* weit über die bloße Anwendung von fortschrittlichen Simulationsverfahren anstelle von realen Tests hinaus. Die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von Leichtbaustrukturen erfordert ein umfassendes System aus hierarchischen Modellen, Strukturtests und unterstützenden Analysemethoden, um die Aussagefähigkeit der Simulation sicherzustellen [3]. Dabei wird typischerweise die Fähigkeit angestrebt, progressive Materialschädigungen bis hinzu lokalem Materialversagen sowie alle kaskadierenden Effekte bis hin zum Totalversagen der Gesamtstruktur simulativ beschreiben zu können [4]. Ein Großteil der vorhandenen Literatur auf diesem Gebiet entstammt der materialwissenschaftlichen Sicht auf das Problem und fokussiert die Bruchmechanik von FKV mit dem Ziel, die Entwicklung von neuartigen Materialverbunden zu unterstützen. Dabei wird grundsätzlich zwischen einem *Bottom-Up* oder *Top-*

Down Vorgehen unterschieden. Ersteres basiert auf der Bestimmung des Konstituentenverhaltens von kleineren zu größeren Längenmaßstäben. Das *Top-Down* Vorgehen beginnt hingegen mit einem makroskopischen Modell, welches nur nach Bedarf durch Einbeziehung von Informationen aus detaillierteren Untersuchungen erweitert wird [3]. Die kürzlich erschienene Arbeit von OKEREKE et al. [6] beschreibt den Stand der Forschung dieser materialwissenschaftlichen Sicht umfassend. Zusätzlich dazu sind in der Literatur konstruktiv-technische Ansätze zur Auslegung von Leichtbaugesamtstrukturen beschrieben. Analog zu den zuvor beschriebenen materialwissenschaftlichen Ansätzen wird die Strukturanalyse auf verschiedenen Ebenen der Komplexität der Zielstruktur durchgeführt. Hierbei wird typischerweise in einem *Bottom-Up* Vorgehen von einfachen Prüfkörpern über Subkomponenten und Komponenten bis hin zur Gesamtstruktur vorgegangen. Dabei baut jede Ebene auf den Erfahrungsgewinn der Vorigen auf und ermöglicht so sukzessive den Aufbau komplizierter Modelle. Dieses Vorgehen wird allgemein hin als „*Building Block Approach*“ (BBA) bezeichnet [5] und hat sich insbesondere in der Luftfahrt bei der Entwicklung und Auslegung von FKV-Leichtbaustrukturen etabliert.

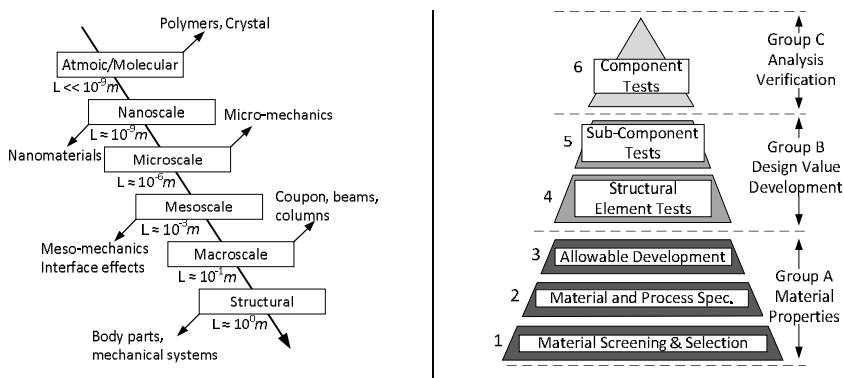


Bild 1 *links*: Längenmaßstäbe beim virtuellen Testen von Materialien [6]; *rechts*: Building Block Approach in typischer Pyramidendarstellung [5]

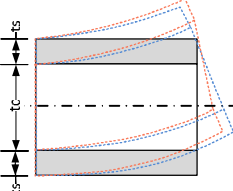
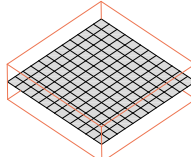
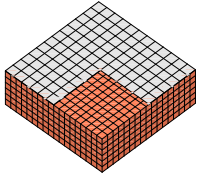
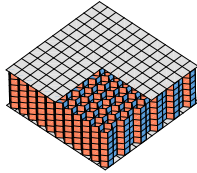
Beide beschriebenen Sichten haben das Ziel durch die synergetische Kombination aus hierarchischen Simulationen und Tests, Entwicklungsaufwand zu reduzieren und dabei die Ergebnisqualität zu erhöhen. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in dem abgedeckten Längenmaßstab und damit in ihrem primären Anwendungsgebiet sowie den eingesetzten Methoden. Die Übergänge zwischen beiden Sichten sind jedoch fließend. Die materialwissenschaftliche Sicht befasst sich typischerweise mit deutlich kleineren Längenmaßstäben, beginnend bei molekularen Zusammenhängen und häufig endend bei Coupongröße (s. Bild 1). Beim BBA dagegen wird in der Regel darauf hingearbeitet, große Gesamtstrukturen, wie zum Beispiel die Tragflä-

che eines Flugzeuges, zu analysieren und auszulegen (s. Bild 1). Das Anwendungsbeispiel der vorliegenden Arbeit siedelt sich zwischen beiden Sichten an. Es geht dabei einerseits um die Auslegung von Sandwichverbindungen, wofür sich der BBA anbietet. Das Problem ist gleichzeitig jedoch sehr lokal und erfordert einen hohen Detailgrad und damit einen eher kleinen Längenmaßstab.

2.2 Modellierung von Sandwichstrukturen

Die Besonderheit der Sandwichbauweise im Vergleich zu reinen FKV-Strukturen ist der mechanisch schwache Kern, welcher das Versagen des Verbundes maßgeblich beeinflusst. Je nach erforderlichem Detailgrad, kann zwischen verschiedenen Herangehensweisen beim Aufbau von Simulationsmodellen für Sandwichstrukturen (SWS) unterschieden werden. Tabelle 1 stellt z.B. die Unterteilung in vier Kategorien nach NOOR et. al [7] dar.

Tabelle 1: Herangehensweisen zur Modellierung von Sandwichstrukturen

Vereinfachte Modelle	2D Schalen- und Plattenelemente	3D-Kontinuummodelle	Detaillierte Modelle
			
Sandwichbalkentheorie	Diskrete Lagen	z.B. Shell-Solid-Shell	Meso/Micro Ebene

Vereinfachte Modelle basieren meist auf analytischen Gleichungssystemen und werden in der Regel zur Modellierung von einzelnen spezifischen Effekten entwickelt (z.B. Verformung im Biegeversuch, Deckschichtknittern im Druckversuch ect.). 2D Schalen- und Plattenelemente, basierend auf homogenisierten Eigenschaften oder diskreten Lagenaufbauten, stellen die einfachste numerische Modellierung auf Basis der FEM dar. Entsprechende Modelle sind geeignet die globale Verformung von Sandwichstrukturen abzubilden. Die wichtigen transversalen Versagensmodi können jedoch nicht berücksichtigt werden. Diese Modelle werden aufgrund des geringen Modellierungsaufwandes häufig in frühen Entwicklungsphasen zum Beispiel zur Abschätzung von externen Schnittstellenkräften von Kabineninterieur eingesetzt [8]. Die Modellierung des Sandwichkerns mithilfe von 3D-Kontinuumelementen erlaubt die Berücksichtigung von transversalen Versagensmechanismen und wird daher trotz deutlich erhöhtem Modellierungs- und Berechnungsaufwands zur detaillierten Abbildung von Gesamtstrukturen bis hin zur Bauteilebene eingesetzt [9]. Die Kategorie der detaillierten Modelle umfasst alle Modellierungsmetho-

den die über den Einsatz von homogenisierten Kontinuumelementen hinausgehen. Dies ist insbesondere bei zellulären Strukturkernen zur Berücksichtigung von lokalen Kräfteinleitungen notwendig. Dabei wird die tatsächliche Geometrie des Strukturkerns nachmodelliert. Bei Honigwabenkernen bedeutet dies, dass die dünnen Zellwände ausmodelliert werden, um so realistische Verformungen der Zellen infolge von Stabilitätsversagen abbilden zu können. Die numerische nicht-lineare Berechnung dieses hohen Detailgrades erfordert leistungsfähige Rechnersysteme und hat sich erst in der vergangenen Dekade insbesondere für die Untersuchung von Impact-Problemen bei Sandwichpanels etabliert [10].

2.3 Virtuelles Testen von Sandwichverbindungen

Sandwichverbunde eignen sich generell nicht für die Einleitung von lokalen Kräften, weil der Kern nicht die Steifigkeit besitzt die Kräfte adäquat zu übertragen [2]. Das Fügen von Sandwichstrukturen lässt sich jedoch häufig nicht vermeiden. Die dafür erforderlichen lokalen Verstärkungen führen zu komplizierten Spannungszuständen und erfordern besondere Aufmerksamkeit in der Auslegung. Ein typisches Beispiel für lokal verstärkte Sandwichverbindungen sind eingeklebte metallische Gewindeinserts zum Verschrauben von Elementen senkrecht zur Panelfläche (Bild 2).

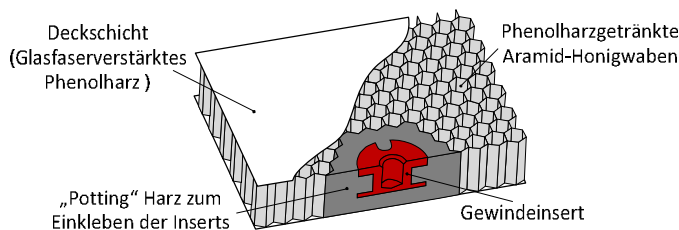


Bild 2 Typisches Sandwich-Gewindeinsertsystem

Zur Abschätzung der Festigkeit dieser Verbindungen in frühen Phasen des PEP gibt es vereinfachte Modelle basierend auf der Sandwichplattentheorie höherer Ordnung [11]. Aufgrund der gemachten Vereinfachungen, insbesondere für den zellulären Kern, eignen sich diese Modelle jedoch nicht für einen virtuellen Test wie in Abschnitt 2.1 beschreiben. Die letztendliche Festigkeitsbestimmung dieser Verbindungen erfordert aktuell in der Regel Realtests. Bei der Vielzahl von tatsächlich vorkommenden Varianten dieser Verbindung, wäre es wünschenswert die Anzahl der nötigen Tests zu reduzieren. Wenn beispielsweise nur ein Systemparameter (z.B. Deckschicht) im Vergleich zu einer bereits getesteten Verbindung variiert wird, liegt es nahe diese neue Variante durch einen virtuellen Test abzudecken. In der Literatur gibt es erste

Ansätze diese Insertverbindung durch detaillierte Modelle (vgl. Tabelle 1) basierend auf der FEM zu berechnen [12]. Die bisher durchgeführten numerischen Studien dienen jedoch ausschließlich zur Nachvollziehung der komplizierten Versagensmechanismen. Virtuelle Tests sind in der Literatur bisher nicht beschrieben. Die Entwicklung eines virtuellen Testverfahrens für diese Insertverbindungen dient als Anwendungsbeispiel in der vorliegenden Arbeit.

3 Ansatz zum Aufbau virtuellen Testverfahrens für Sandwichinserts

Der hier vorgestellte Ansatz orientiert sich prinzipiell an die in 2.1 vorgestellten grundsätzlichen Ansätze. Dabei werden die Besonderheiten der Sandwichbauweise im speziellen berücksichtigt. Bild 3 stellt das Vorgehen am Beispiel einer Sandwichinsertverbindung dar. Der Kern des Vorgehens ist ein hierarchisches System aus verschiedenen Detailebenen, wobei in jeder Ebene prinzipiell die gleichen Schritte zur Modellbildung durchlaufen werden. Dieser Modellentwicklung geht eine umfassende Problemanalyse sowie die Definition des Detailgrads voraus. Für eine Einbindung in den PEP enthält das Vorgehen letztlich den Schritt der Modelverwendung und Rückführung der Ergebnisse. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte und die jeweils eingesetzten Methoden am Anwendungsbeispiel der Insertverbindung kurz erläutert.

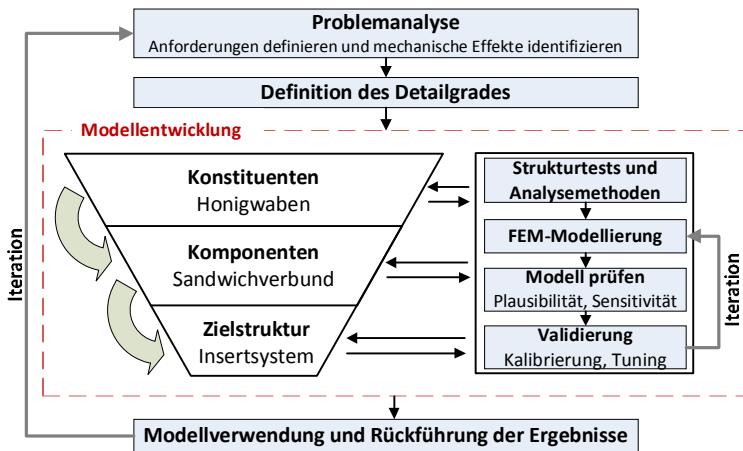


Bild 3: Ansatz zum Vorgehen bei der Entwicklung von virtuellen Testverfahren für Sandwichstrukturen am Beispiel von Sandwichinserts

3.1 Problemanalyse

Die Grundlage für jeden Problemlösungsprozess ist die Analyse der Problemstellung und die damit einher gehende Definition der Anforderungen. Wie

in Abschnitt 2.1 beschrieben, ist die Anforderung an einen virtuellen Strukturtest typischerweise die Abbildung des nicht-linearen Materialverhaltens bis hin zum Totalversagen der Struktur in Folge eines definierten Lastkollektivs. In erweiterten Anwendungen, kann zusätzlich die Vorhersage der Versagenswahrscheinlichkeit basierend auf einer adäquaten Berücksichtigung der auftretenden Unsicherheiten gefordert sein. Weiterhin kann auch die Anzahl der abzubildenden Lastkollektive zunehmen, sodass neben quasi-statischen auch hochdynamische oder zyklische Lasten abgebildet werden sollen. In dem Anwendungsbeispiel dieser Arbeit geht es jedoch zunächst nur darum, das nicht-lineare Kraft-Weg-Verhalten beim quasi-statischen Auszugsversuch des Inserts bis zum Totalversagen abzubilden.

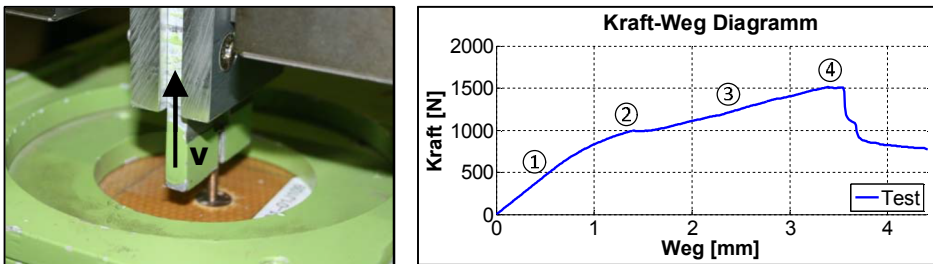


Bild 3: Prüfaufbau für Zugversuch an Sandwichinserts mit Kraft-Weg Kurve des Zugversuchs (zur Verfügung gestellt von der Fa. DIEHL Service Modules)

Die zugrunde liegenden Testergebnisse basieren auf dem Prüfaufbau und der Versuchsdurchführung, wie sie im Insert Design Handbook (IDH) [13] vorgeschlagen werden. Ein quadratisches Sandwichpanel, in dessen Mitte das Insert eingebracht ist, wird an eine kreisförmig ausgeschnittene Gegenhaltervorrichtung angelegt und das Insert durch konstante Verfahrensgeschwindigkeit der Prüfmaschine herausgezogen (Bild 3). Zur Nachbildung der Kraft-Weg Kurve ist es zunächst wichtig die mechanischen Effekte, die den Verlauf der Kurve definieren zu verstehen. Dazu wird zunächst der Verlauf der Kurve analysiert. Auf Basis der Versuchsbeobachtung sowie vorhandener Literatur werden dann die maßgeblichen mechanischen Effekte dem Kurvenverlauf zugeordnet. Es können vier Phasen im Kurvenverlauf ausgemacht werden. Phase ① entspricht der linear-elastischen Verformung des schadensfreien Systems. In Phase ② kommt es zu einem parabelförmigen Abflachen der Kurve. Dies ist auf das Schubbeulen der Honigwabenzellwände zurückzuführen. Dies kann zwar nicht direkt im Versuch beobachtet werden, es wurde jedoch in früheren Arbeiten mithilfe von numerischen Studien nachgewiesen [12]. Phase ③ entspricht erneut einem linearen Verlauf. Aufgrund des Schubversagens des Kerns, kann vermutet werden, dass nun die Deckschichten die Hauptlast in Form einer Zugbelastung aufnehmen und sich dabei line-

ar-elastisch weiter verformen. In Phase ④ kommt es zum Bruch der oberen Deckschicht und schließlich zum Totalversagen der Verbindung. Damit sind die Anforderungen definiert, der angestrebte Kurvenverlauf beschrieben und die wesentlichen mechanischen Effekte sind zugeordnet.

3.2 Definition des Detailgrades

Der nächste Schritt ist die Festlegung des notwendigen Detailgrads des virtuellen Testmodells. In Abschnitt 2.2 werden die detaillierten Modelle als Voraussetzung für eine realistische Modellierung der Zellwandverformung von Honigwabensandwichstrukturen eingeführt. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel ist es notwendig die Krafteinleitung in die einzelnen Zellwände richtig abzubilden, um damit das Schubbeulen als ersten Versagensmodus simulieren zu können. Als Detailgrad wird daher ein detailliertes Modell mit 2D 4-Knotenelementen für Zellwände und Deckschichten festgelegt.

3.3 Modellentwicklung

Für die hierarchische Modellentwicklung müssen zunächst die erforderlichen Untersuchungsebenen („Building Blocks“) festgelegt werden. Dies sollte nach Bedarf auf Basis der Problemanalyse und der Festlegung des Detailgrades erfolgen. Das Ausziehen der Inserts wird durch zwei mechanische Effekte maßgeblich definiert. Das Schubbeulen der Waben sowie der Bruch der Deckschicht. Die Wahl der Untersuchungsebenen sollte sich daran orientieren. Entsprechend wird der Wabekern als erster Building Block definiert. Die Deckschichten könnten zusätzlich auf unterster Ebene in Coupon Tests untersucht werden. Diese Ergebnisse liegen jedoch bereits durch frühere Untersuchungen vor. Auf Basis dieser vorhandenen Materialdaten wird als zweite Untersuchungsebene der Sandwichverbund definiert. Dies erlaubt es das Zusammenspiel von Kern und Deckschichtmaterial zu charakterisieren, wobei die vorhandenen Deckschicht-Materialdaten noch einmal überprüft werden und ggf. angepasst werden können. Als letzte Untersuchungsebene folgt der Auszugsversuch des Insertsystems als Zielstruktur. Die zwei weiteren Komponenten Metallinsert und Klebermasse werden damit zunächst vernachlässigt, da die Problemanalyse darauf hindeutet, dass ihr Einfluss auf das nicht-lineare Verhalten des Gesamtsystems klein ist. Es werden elastische Materialwerte der Literatur für beide Komponenten angenommen. Im Folgenden werden die einzelnen Untersuchungsebenen kurz erläutert. Dabei werden für die erste Ebene die einzelnen Arbeitsschritte beispielhaft etwas näher beschrieben.

Honigwabekern Der untersuchte Wabekern besteht aus Nomex-Aramidpapier. Die für eine Detailmodellierung erforderlichen Materialdaten

des Zellwandmaterials sind schwierig direkt zu bestimmen und werden nicht von den Herstellern angegeben. Die Materialwerte können jedoch in einem Top-Down Vorgehen aus einem makroskopischen Test, welcher dann möglichst exakt virtuell nachgebildet wird, abgeleitet werden. Dieser Prozess ist für das hier untersuchte Material detailliert in [14] erläutert. Die einzelnen Schritte werden in diesem Beitrag nur kurz beschrieben.

Strukturtest und Analysemethoden Voraussetzung in jeder Ebene sind geeignete Strukturtests zur Charakterisierung des Materials. Für Honigwabenkerne sollte mindestens der Kompressionstest (z.B. nach ASTM C363, siehe Bild 4) zur Abbildung des transversalen Versagens sowie Schubversuche in Längs- und Querrichtung (z.B. nach ASTM C273) für das Schubversagen in die Bestimmung der Materialparameter einbezogen werden. Unterstützend dazu sind immer auch weitere Analysemethoden erforderlich. Im einfachsten Fall sollten Lichtmikroskopmessungen der Wandstärken der Zellwände durchgeführt werden. Zusätzlich sollte geprüft werden ob es sich bei dem gefertigten Honigwabenmuster tatsächlich um regelmäßige Honigwaben handelt. In aufwändigeren Studien können auch 3D CT-Messungen eingesetzt werden um die tatsächliche Geometrie der Waben mit allen geometrischen Imperfektionen zu berücksichtigen

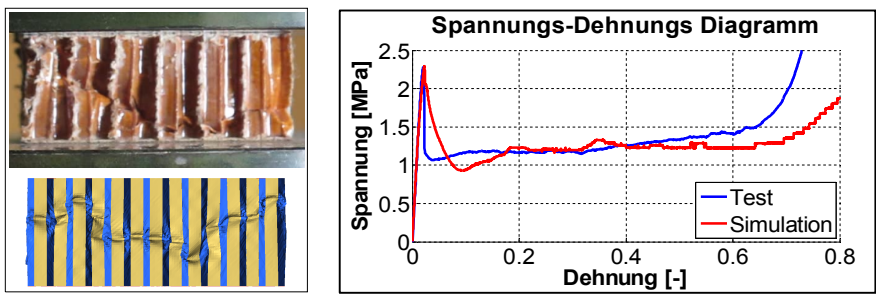


Bild 4 Virtueller Test des Wabenkerns am Beispiel des Kompressionsversuches nach ASTM C363 zur Bestimmung der Zellwandmaterialparameter

FEM-Modellierung Die FEM-Modellierung auf Basis der Strukturtests sowie der Analysemethoden sollte parametrisch (z.B. skriptbasiert) erfolgen, sodass verschiedene Geometrien und Netzfeinheiten schnell generiert werden können. Dies vereinfacht die folgende Modellprüfung erheblich.

Modell prüfen Bevor das FEM-Modell für die Validierung genutzt wird, sollte es eingehend geprüft werden. Dies beinhaltet neben standardmäßigen Netzkonvergenzstudien auch Skalenstudien, zur Bestimmung der erforderlichen Modellgröße (Anzahl Zellen). Weiterhin sollten verschiedene Randbedingungen geprüft werden (z.B. periodische Randbedingungen bei Honigwabenker-

nen). Wird eine Lösung mittels expliziter FEM angestrebt, sollte geprüft werden inwieweit Massenskalierung sowie Dehnratenerhöhung eingesetzt werden können ohne das Ergebnis maßgeblich zu beeinflussen. Bei impliziten Methoden müssen ggf. Stabilisierungsfaktoren zur Unterstützung der Konvergenz angepasst werden. Schließlich müssen ggf. auch verschiedene Materialmodelle auf ihre Eignung geprüft und deren Funktionsweise nachvollzogen werden, um im nächsten Schritt die Validierung durchführen zu können.

Validierung Die Validierung des Modells erfolgt abschließend durch Vergleich der Versuchsdaten mit der Simulation. Das Modeltuning der Materialparameter kann bei einfachen Materialmodellen manuell erfolgen. Alternativ können Optimierungsverfahren eingesetzt werden. In jedem Fall müssen geeignete Kriterien bestimmt werden, welche definieren wann das Modeltuning abgeschlossen ist.

Sandwichverbund Analog zum Kernmaterial wird in der folgenden Untersuchungsebene der Sandwichverbund untersucht. Hierfür eignet sich der 4-Punktbiegeversuch (z.B. nach ASTM C393) sehr gut, da dieser eine Vielzahl verschiedener Versagensmechanismen hervorrufen kann. Es sollte untersucht werden ob das Verbundmodell lokales Eindringen, Schubversagen und Deckschichtversagen richtig abbilden kann. Das Ergebnis für die zweite Untersuchungsebene ist in Bild 5 beispielhaft dargestellt.

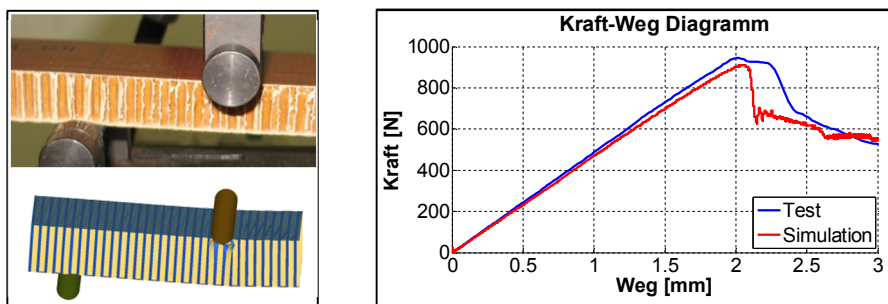


Bild 5: Virtueller Test des Sandwichverbundes am Beispiel des 4-Punkt-biegeversuchs nach ASTM C393 zur Validierung des Verbundmodells

Zielstruktur Abschließend werden die Erkenntnisse aus den zuvor analysierten Ebenen in das Modell der Zielstruktur integriert. Das vorläufige Ergebnis der durchgeführten Studie ist in Bild 6 dargestellt. Das Schubversagen des Kerns scheint richtig abgebildet zu werden. Der lineare Verlauf in Phase ③ wird vom virtuellen Modell jedoch überschätzt, während das Totalversagen zu früh auftritt. Eine mögliche Erklärung wäre, dass der Effekt des Ablösens der Klebmasse von der unteren Deckschicht eine wichtigere Rolle als zunächst

angenommen spielt. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um der auftretende Abweichung zwischen virtuellem und realem Test nachzugehen.

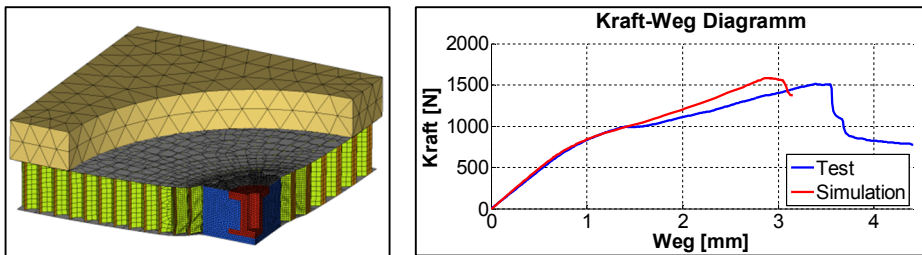


Bild 6: Virtueller Test der Zielstruktur (Insertauszugversuch)

3.4 Modellverwendung und Rückführung der Ergebnisse

Abschließend erfolgt die Nutzung des entwickelten Modells sowie die Rückführung der gewonnen Erkenntnisse in den PEP. Im Anwendungsbeispiel ist das Primärziel in Zukunft frühzeitig abschätzen zu können, wie sich die Festigkeit der Verbindung bei der Verwendung von alternativen Kernmaterialien und Deckschichten verändert. Der Einfluss eines anderen Kerns könnte beispielsweise durch die Wiederholung der ersten Ebene und die anschließende Integration der neuen Parameter ins Gesamtmodell vorhergesagt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird auf Basis bestehender Ansätze zum Aufbau virtueller Testverfahren, ein angepasstes anwendungsnahes Vorgehen zur Entwicklung eines virtuellen Testmodells für Sandwichstrukturen am Beispiel einer Honigwaben-Insertverbindung vorgestellt. Das vorläufige Ergebnis des entwickelten Modells liefert bereits eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich um die noch auftretenden Abweichungen erklären zu können. Weiterhin muss noch nachgewiesen werden, dass das entwickelte Modell nicht nur die der Entwicklung zugrundeliegende Insertverbindung richtig abbildet, sondern auch Verbindungen mit variierenden Deckschichten und Kernmaterialien bzw. –geometrien. Schließlich soll das vorgestellte Vorgehen auf weitere Sandwichstrukturen angewendet und weiterentwickelt werden.

Literatur

- [1] Stark, R. et al.: "Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie" in: Informatik Spektrum, Vol. 34, S. 20-28, 2011

-
- [2] Zenkert, D.: "The Handbook of Sandwich Construction", EMAS Ltd., Worcestershire UK, 1997
- [3] Cox, B. N. et al.: "Practical Challenges in Formulating Virtual Tests for Structural Composites" In: Computational Methods in Applied Sciences, Vol. 10, S. 57-75, 2008
- [4] Wood K.: Virtual testing of composites: Beyond make & break, in: High-Performance Composites, Gardner Business Media Inc., Nov. 2012
- [5] "Composite Materials Handbook. Volume 3: Polymer Matrix Composites. Materials Usage, Design and Analysis" (MIL-HDBK-17-3F), Washington DC, Department of Defense, 2002.
- [6] Okereke, M.I. et al.: "Virtual testing of advanced composites, cellular materials and biomaterials: A review", Composites Part B (60), S.637-662, 2014.
- [7] Noor, A. et al. "Computational models for sandwich panels and shells", Applied Mechanics Reviews, Vol. 49, Nr. 3, S. 155-199, 1996.
- [8] Seemann, R. et al.: "FE-Modelling guidelines for the dimensioning of cabin interior under stationary dynamic loads", Proceed. of the ICAS 2014, St. Petersburg, accepted for publication, 2014.
- [9] Zinno, A. et al. "Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application", Composite Structures Vol. 92, Nr. 9, S. 2208–2219, 2010
- [10] Abrate, S. et al.: Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures, in Solid mechanics and its applications Vol. 192, Springer, 2013
- [11] Thomsen, O.T.: "Sandwich plates with 'through-the-thickness' and 'fully potted' inserts: evaluation of differences in structural performance", Composite Structures, Vol. 40, Nr .2, S. 159-174, 1998
- [12] Heimbs S. und Pein M., "Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts". Composite Structures, Vol. 89, Nr .4, S. 575-588, 2009
- [13] Insert Design Handbook, ECSS-E-30-06 Draft 3, European Cooperation for Space Standardization , 2005
- [14] Seemann, R. and Krause, D.: "Numerical Modelling of Nomex Honeycomb Cores for Detailed Analyses of Sandwich Panel Joints". Proceed. of the WCCM XI, Barcelona 2014.