

## Sandwich-Wabenkerne

# FE-Simulation zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Wabenkerne werden in zahlreichen Leichtbau-Sandwichstrukturen eingesetzt und zeichnen sich durch eine Vielfalt an möglichen geometrischen Zellkonfigurationen aus. Explizite dynamische Simulationsmethoden ermöglichen die effiziente Bestimmung der mechanischen Eigenschaften solcher Wabenkerne anhand virtueller Prüfungen.

Sandwich-Verbunde bestehen aus zwei dünnen, steifen Deckschichten und einem vergleichsweise dicken, möglichst leichten Kern. Sie werden aufgrund ihres exzellenten Leichtbau-Potenzials neben Hightech-Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt oder Formel 1 auch in zahlreichen Anwendungen im Schienen- und Straßenfahrzeugbau, im Bauwesen und in der Möbel- und Verpackungsindustrie eingesetzt. Neben Schäumen werden hierbei vor allem Wabenkerne verwendet, die oftmals, dem natürlichen Vorbild der Honigwaben entsprechend, eine hexagonale Zellstruktur besitzen (Bild 1). Je nach Anwendungsfall, der etwa eine maximale Druckfestigkeit, Schubfestigkeit, Verformbarkeit oder Belüftbarkeit des Kerns erfordern kann, steht der idealen geometrischen Auslegung der Zellstruktur ein großer Designspielraum offen. Auch Untersuchungen neuer kostengünstiger Herstellungsprozesse können Treiber für die Entwicklung neuer Kernstrukturen sein. Dies führte neben den Hexagonalwaben in den letzten Jahren zu der Entstehung zahlreicher alternativer Zellkonfigurationen (z. B. Flexcore, Tubuswaben oder Faltwaben).

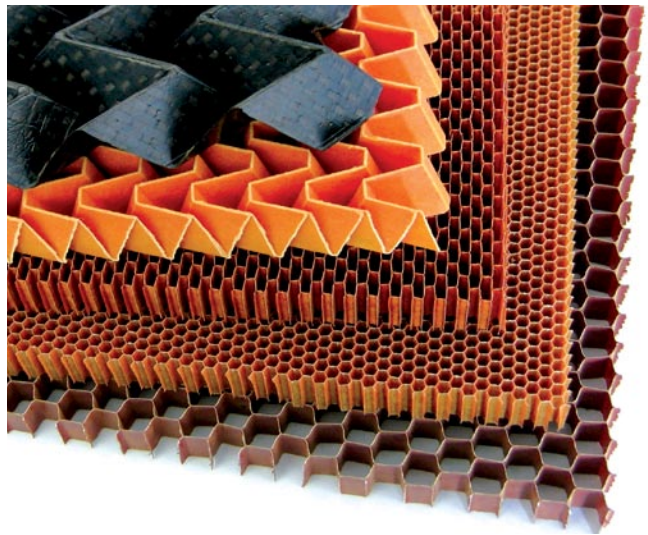


BILD 1 Verschiedenartige Wabenkernstrukturen



»Eine effiziente Alternative zur aufwändigen Prototypenherstellung besteht in der virtuellen Prüfung von Kernstrukturen mit Hilfe von FE-Simulationen.«

Dr.-Ing. Sebastian Heimbs, EADS Innovation Works

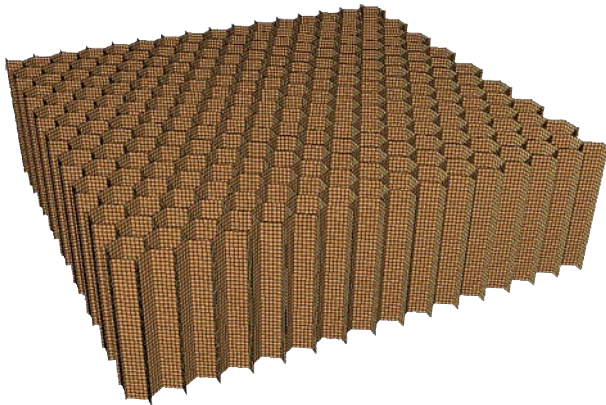


BILD 2 Honigwaben-Modell

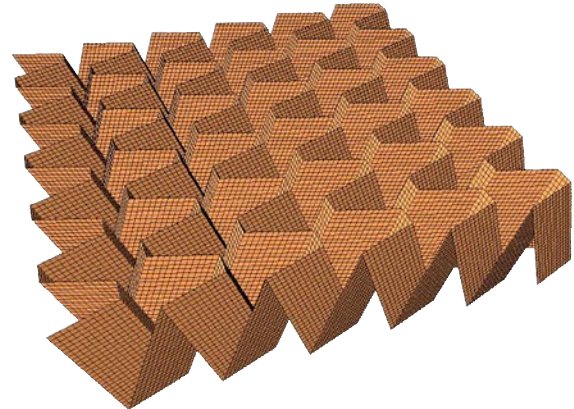


BILD 3 Faltwaben-Modell

### VORTEIL VIRTUELLER TESTS

Da die Auslegung eines Sandwich-Bauteils die genaue Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der meist anisotropen Kernstrukturen erfordert, sind hierfür umfangreiche Versuchsreihen notwendig. Hierbei stehen in erster Linie die transversalen Normal- und Schubeigenschaften im Mittelpunkt des Interesses, oftmals jedoch noch darüber hinaus die Eigenschaften in der Kernebene. Gerade bei innovativen Kernstrukturen oder einer Kerngeometrie-Optimierung umfassen solche Versuchsreihen auch eine aufwändige Prototypenherstellung. Eine effiziente Alternative besteht daher in der virtuellen Prüfung von Kernstrukturen mit Hilfe von FE-Simulationen (Finite Elemente) unter Verwendung expliziter Simulationscodes wie LS-Dyna. Derartige virtuelle Tests können Simulationen von Druck-, Zug- oder Schubversuchen in sämtlichen Materialrichtungen oder auch kombinierte Belastungen darstellen. Für die Validierung dieser Simulationsmodelle ist nur ein Minimum an experimentellen Daten erforderlich. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, bedarf es jedoch der Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren, die im Folgenden dargestellt werden.

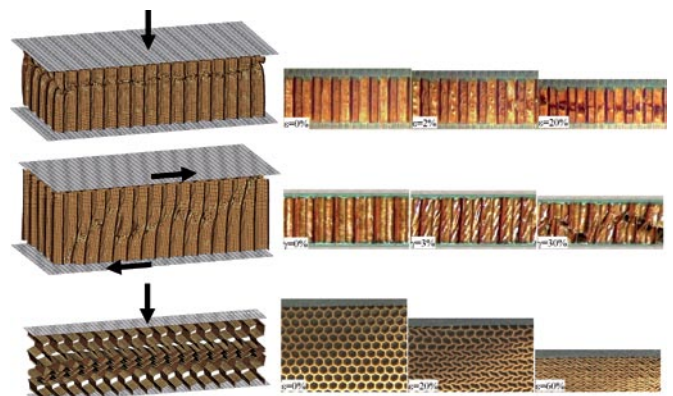
### MATERIALMODELLIERUNG DER ZELLWÄNDE

Die Grundlage virtueller Tests bildet das Mesomodell der Wabenkernstruktur mit Schalenelementen für die Zellwände (Bilder 2 und 3), das idealerweise auf parametrischer Basis erstellt wird, um Geometrieänderungen einfach vornehmen zu können. Als Zellwandmaterial können unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz kommen. Zellwände aus duktilen Materialien zeigen unter Druck- oder Schublast typischerweise ein Beulmuster als Stabilitätsversagen, gefolgt von einem kontinuierlichen Zusammenfallen im Drucklastfall. Hierzu zählen Waben aus Aluminium und auch dünnem Phenolharz-impregnierten Nomex-Wirrfaserpapier. Auf der anderen Seite stehen spröde Werkstoffe wie Faserverbund-Laminat, bei denen es je nach Wanddicke auch zu einem Beulen kommen kann, das dann jedoch von einem Materialbruch gefolgt wird. Während die Materialmodellierung der Zellwände bei isotrop zu betrachtenden Werkstoffen wie Aluminium oder etwa Polypropylen noch vergleichsweise überschaubar ist, ist dies bei Faserverbund-La-

### ÜBER LS-DYNA

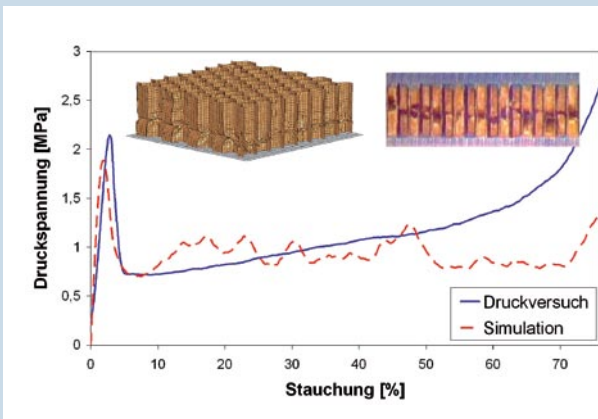
LS-Dyna ist ein Softwarepaket der Livermore Software Technology Corp. (LSTC), mit dem Phänomene der Kurzzeitdynamik, also das hochgradig nichtlineare und dynamische physikalische Verhalten von Strukturen, nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) analysiert werden können. Außer zur Simulation von Crash- sowie Metallumformvorgängen wird es vor allem im Automobil-, Luft- und Raumfahrtbereich intensiv für die detaillierte Berechnung sicherheitsrelevanter Komponenten eingesetzt. LS-Dyna-Software und -Ingenieurdienstleistungen werden seit 1987 von der CADFEM GmbH aus Grafing bei München angeboten ([www.cadfem.de](http://www.cadfem.de)). CADFEM auf der EuroLite 2009: Stand 1212 (Gemeinschaftsstand des Leichtbau-Clusters).

BILD 4 Zellwanddeformation von Nomex-Honigwaben in Simulation und Versuch unter Drucklast in Dickenrichtung, Transversalschub und Drucklast in der Wabenebene

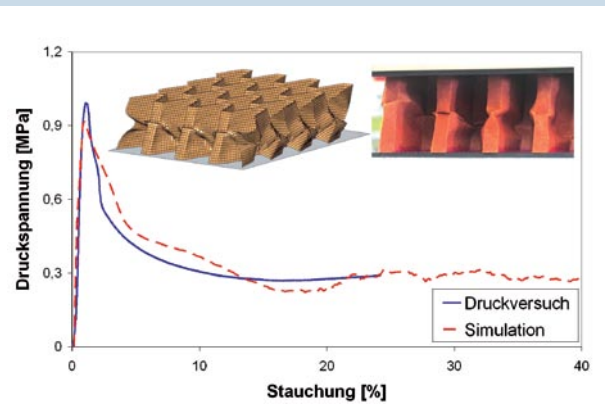


minaten oder impregniertem Nomex-Papier wesentlich komplexer. Oft unzureichende Kennwertangaben und Materialkurven aus der Literatur sind bei eher exotischen Materialien durch zusätzliche Prüfsreihen abzusichern. Das Nomex-Papier der verbreiteten Nomex-

**BILD 5** Druckspannungsverlauf einer Nomex-Honigwabe in Simulation (Einzelzelle) und Versuch (größere Probe)



**BILD 6** Druckspannungsverlauf einer Kevlar-Faltwabe in Simulation und Versuch



Honigwaben zeigt hierbei zum Beispiel ein richtungsabhängiges elasto-plastisches Materialverhalten, das mit einem geeigneten Materialmodell in LS-Dyna abbildbar ist.

### IMPERFEKTIONEN

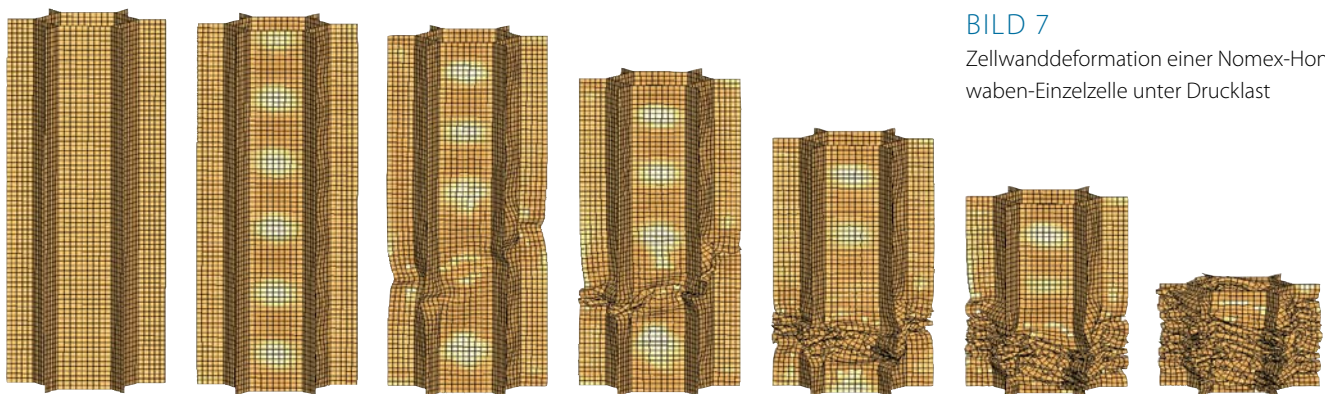
Auch mit einem noch so präzise eingestellten Materialmodell wird ein ideal einheitliches Mesomodell die Realität nicht abbilden können, da sich zelluläre Strukturen durch herstellungsbedingte Imperfektionen auszeichnen, die einen starken Einfluss auf die elastischen Eigenschaften und das Beul- oder Festigkeitsversagen haben. Diese Imperfektionen können sowohl geometrischer Natur sein (z. B. irreguläre Zellformen, unebene Zellwände und Wanddickenschwankungen) als auch innerhalb des Zellwandmaterials auftreten (z. B. Risse, Poren und Harzanhäufungen in Ecken) und müssen mit geeigneten Mitteln im Modell berücksichtigt werden. Als Grundlage hierfür ist zunächst eine genaue Kenntnis der vorhandenen Imperfektionen erforderlich, die beispielsweise anhand von mikroskopischen Aufnahmen charakterisiert werden können. Möglichkeiten der Implementierung von geometrischen Imperfek-

tionen können von der globalen Verzerrung der Zellgeometrie im parametrischen Modell vor der Vernetzung über die lokale Verzerrung sämtlicher Knotenkoordinaten (Nodeshaking) bis hin zur Superposition der ersten Beulmoden auf die Zellwandnetze reichen. Materialimperfektionen können etwa durch stochastisch verteilte Änderungen der Materialparameter oder Wanddicken einzelner Elemente eingebracht werden. Weitere Details zur Modellierung können in Quelle /1/ gefunden werden.

### EINFLÜSSE AUF DAS SIMULATIONSERGEBNIS

Zahlreiche weitere Faktoren haben einen Einfluss auf das Simulationsergebnis, allen voran die Netzfeinheit, die in Konvergenzstudien eingestellt werden muss, da zu grobe Netze das Beulen und Falten der Zellwände nicht korrekt abbilden können.

Auch die Modellgröße, also die Zahl der Einheitszellen, sowie die Randbedingungen spielen eine Rolle. Im Simulationsmodell kann mit periodischen Randbedingungen eine theoretisch unendlich große Wabenstruktur betrachtet werden. Hierbei ist jedoch zu beachten,



**BILD 7**

Zellwanddeformation einer Nomex-Honigwaben-Einzelzelle unter Drucklast



dass eine Vergleichbarkeit zu Versuchsdaten im Rahmen der Validierung gegeben sein soll, und der freie Rand der realen Probe hat einen großen Einfluss auf das Strukturverhalten. Da in der Realität auch nicht alle Zellen gleichzeitig versagen, sondern, imperfektionsbedingt, in einer gewissen Abfolge, so sind die Lastkurven bei größeren Proben auch typischerweise glatter als etwa bei Einzelzellenmodellen, bei denen jede Zellwandfaltung einen Kurvenausschlag zur Folge hat. Als weiterer Einflussfaktor ist die Simulationszeit bzw. die Lastgeschwindigkeit zu nennen. Da das mechanische Verhalten von Wabenkernstrukturen lastratenabhängig ist und bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten die Zellwandträgheiten bei den Faltungsvorgängen eine Rolle spielen, ist die Lastrate derjenigen des Vergleichsversuchs anzupassen. Die Versuchsdaten stammen jedoch meist aus quasistatischen Tests. Die Berechnung würde bei expliziten FE-Simulationen aufgrund der typischen sehr kleinen Zeitschrittweiten zu einer sehr großen Rechenzeit führen. Da die Zeitschrittweite neben der Elementkantenlänge und den elastischen Eigenschaften auch von der Materialdichte abhängt, bietet sich hier die Technik der Massenskalerung an, um auf diese Weise – unter der Voraussetzung einer vernachlässigbaren Zunahme der kinetischen Energie – eine künstliche Zeitschritterhöhung und eine akzeptable Rechenzeit zu erzielen.

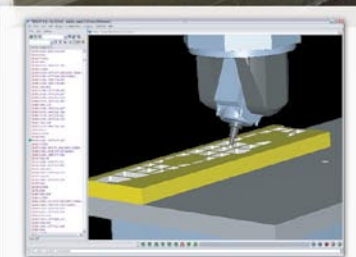
#### SIMULATIONSERGEBNISSE

Mit einem validierten Modell können virtuelle Druck-, Zug- oder Schubversuche in allen Materialrichtungen durchgeführt werden (Bild 4), um auf diese Weise die kompletten nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Kurven zu erhalten (Bild 5 und 6). Der Kurvenverlauf im Bereich großer Dehnungen ist vor allem für Energieabsorptionsanwendungen von Bedeutung. Diese vollständigen Daten sind in der Regel weder in den Datenblättern der Wabenhersteller zu finden noch Gegenstand typischer Versuchsreihen, die normalerweise nur wenige Lastfälle in einzelnen Richtungen umfassen (i. d. R. Druck in Dickenrichtung und Transversalschub).

Während das strukturelle Zellwand-Deformationsverhalten von Papierwaben (z. B. Nomex-Honigwabenkern, Bild 7) sowie die zugehörigen Spannungskurven in sehr guter Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen abgebildet werden können, ist das spröde Bruchverhalten, etwa von Faltwaben aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen (CFK),

eine größere Herausforderung. Werden Elemente nach üblicher Vorgehensweise nach einem spröden Versagen erodiert, das heißt aus der Rechnung herausgenommen, so ergibt sich eine Kontaktproblematik zwischen den separierten oberen und unteren Modellhälften, die aufgrund der angewinkelten Geometrie nicht mehr miteinander in Kontakt treten, sodass hier nur das Strukturverhalten bis zum Versagen zuverlässig ausgewertet werden kann.

## Angst vor 5-Achs Bearbeitung?



#### Maschinensimulation auf Basis des CNC-Codes!

VERICUT ist die weltweit führende Software für CNC-Simulation

**Ist es die Angst vor einem teuren Crash, die Sie davon abhält Ihre 5-Achs CNC-Maschine so effektiv wie möglich zu nutzen?**

VERICUT simuliert die CNC-Fertigung (unabhängig von Maschine, Steuerung und CAM Systemen) und überprüft das NC-Programm auf Kollisionen und Fehler vor dem echten Maschinenlauf. VERICUT optimiert darüber hinaus die Bearbeitungsvorschübe des NC-Programms, so dass die Fertigung effizienter und schonender abläuft. Auch bei Ihnen!

Get a **FREE Virtual Machining Gallery CD Today!**

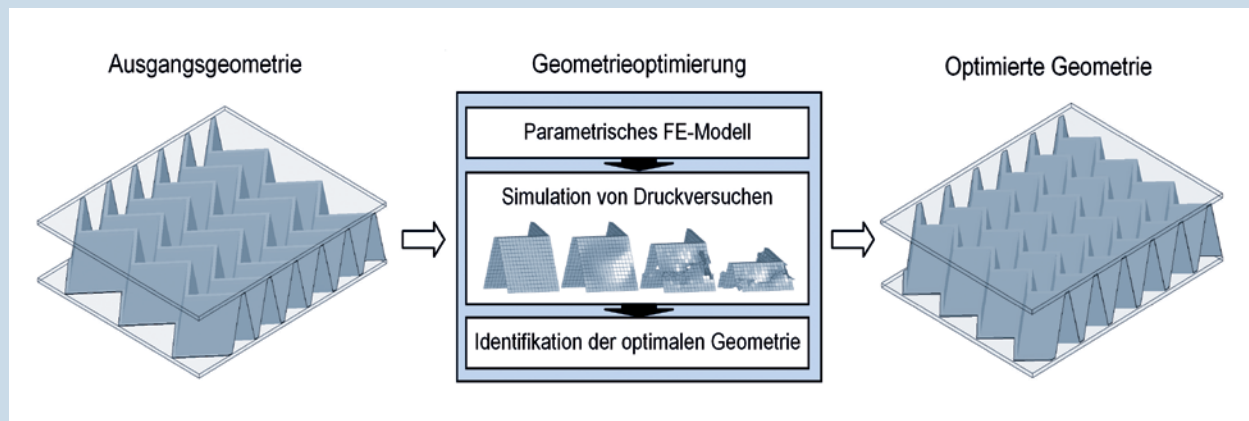


CGTech Deutschland GmbH, Neusser Landstr. 384, D-50769 Köln +49 (0)221-97996-0 info.de@cgtech.com

# VERICUT®

CGTECH.de

BILD 8 Optimierung einer CFK-Faltengeometrie hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit



In zwei beispielhaft angeführten Studien konnten die auf diese Weise numerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven als Ergänzung zu experimentellen Daten für eine homogenisierte Kernmodellierung im Rahmen der Crash-Simulation von Sandwich-Strukturen mit Nomex-Honigwabekern in Flugzeugkabinenkomponenten /2/ sowie einer Flugzeugrumpfstruktur in Sandwich-Bauweise mit Faltwabekern /3/ genutzt werden.

#### ANWENDUNG FÜR GEOMETRIEOPTIMIERUNG

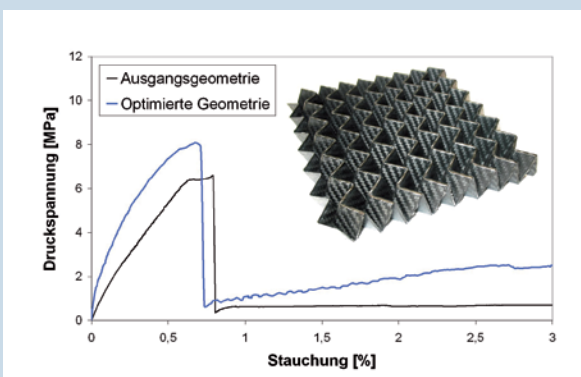
Das größte Potenzial dieser Methode der virtuellen Tests an Wabenkernstrukturen liegt zweifelsohne in der Entwicklung neuer, für spezielle Anwendungen optimierter Zellgeometrien. So wer-

den zurzeit nicht nur in der Industrie, sondern auch in zahlreichen akademischen Einrichtungen neue Sandwich-Kernstrukturen entwickelt, um spezifischen Anforderungen des modernen Leichtbaus gerecht zu werden. Kostspielige Herstellungen und Prüfungen von Proben sowie Fertigungsmitteln können mit Hilfe virtueller Prüfungen auf ein Minimum reduziert werden.

Als Fallbeispiel sollte eine existierende CFK-Faltwabenstruktur, die im Bereich der Luftfahrtforschung entwickelt wurde /4/, hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit optimiert werden. Hierbei handelt es sich um eine Faltwabe in Zick-Zack-Geometrie, die aus CFK-Gewebe-Prepreg mittels eines Faltprozesses hergestellt wird. Die globale Dichte sowie die Zellwanddicke sollten bei der Optimierung identisch bleiben sowie weitere Randbedingungen in Bezug auf die Herstellbarkeit erfüllt sein, die durch den Faltprozess und die entsprechenden Werkzeuge gegeben sind.

Mit Hilfe des parametrischen Modells und von virtuellen Druckversuchen mit LS-Dyna konnte auf sehr effektive Weise im Rahmen einer Optimierungsstudie eine verbesserte Zellgeometrie ermittelt werden (Bild 8). Hierbei wurde zunächst der Einfluss einzelner Geometrieparameter (z. B. Zellwandlänge und Anstellwinkel oder Zick-Zack-Öffnungswinkel), einzeln sowie in Kombination, auf die globalen Druckeigenschaften untersucht. Für diese Untersuchung bietet sich etwa das zu LS-Dyna gehörende Optimierungstool LS-Opt an. Mit Hilfe dieser Informationen konnte schließlich eine optimierte Geometrie definiert werden, die durch eine Verkleinerung der Zellwandflächen sowie eine geänderte Ausrichtung zur Lastrichtung zu signifikant gesteigerten Druckeigenschaften führte. Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse wurden Prototypen dieses Geometrietyps hergestellt und getestet. Diese Versuchsdaten belegten die Richtigkeit des berechneten Eigenschaftensprofils mitsamt der vorhergesagten Steigerung der Druckfestigkeit um 20 Prozent bei gleicher globaler Dichte (Bild 9).

BILD 9 Vergleich der experimentellen Druckspannungsverläufe der CFK-Faltwabe mit Ausgangs- und optimierter Zellgeometrie (abgebildet)



## ZUSAMMENFASSUNG

Virtuelle Tests von Wabenkernstrukturen mit Hilfe von parametrisch erstellten Modellen in LS-Dyna haben sich als effizientes Tool und Alternative zu experimentellen Probenprogrammen bewährt. Mit einer geeigneten Materialmodellierung der Zellwände sowie der Berücksichtigung von Imperfektionen können die Modelle das reale Zellwanddeformationsverhalten mitsamt der zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Kurven wiedergeben und damit besonders im Entwicklungsprozess neuer Kerngeometrien eingesetzt werden.

## LITERATUR

/1/ Heimbs, S.: Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations, Computational Materials Science, 45(2), 2009, 205 – 216

/2/ Heimbs, S.; Vogt, D.; Hartnack, R.; Schlattmann, J.; Maier, M.: Numerical simulation of aircraft interior components under crash loads, International Journal of Crashworthiness, 13(5), 2008, 511 – 521

/3/ Heimbs, S.; Mehrens, T.; Middendorf, P.; Maier, M.; Schumacher, A.: Numerical determination of the nonlinear effective mechanical properties of folded core structures for aircraft sandwich panels, 6th European LS-DYNA Users Conference, Gothenburg, Sweden, 2007

/4/ CELPACT, EU-Projekt, FP6, Contract AST5-CT-2006-031038, 2006 – 2009

## Der Autor

DR.-ING. SEBASTIAN HEIMBS, EADS Innovation Works, 81663 München, E-mail: sebastian.heimbs@eads.net

English abstract

► Download full English version at: [www.lightweight-design.com](http://www.lightweight-design.com)

## Sandwich Core Structures

## Numerical determination of the mechanical properties with FE simulations

Cellular cores like honeycombs or foldcores are used in numerous lightweight sandwich structures. They offer a variety of different geometrical cell configurations, which can be tailored for the specific application. Explicit finite element (FE) simulation methods allow for an efficient determination of their mechanical properties through virtual testing. This approach is especially useful in the framework of the development of new innovative core structures, where the manufacturing and experimental testing of prototypes is time- and cost-consuming.

WWW.VIEWEGTEUBNER.DE

## Kunststoff, Kunststoff überall



Martin Bonnet

### Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung

verstehen und zuverlässig auswählen

2009. XII, 282 S. Mit 269 Abb. Br. EUR 24,90

ISBN 978-3-8348-0349-8

Als Grundlage für die Auswahl polymerer Werkstoffe in der Ingenieurpraxis werden deren Struktur-/Eigenschaftsbeziehungen genauer beleuchtet. Die Möglichkeiten zur Optimierung der Anwendungseigenschaften über die geeignete Auswahl von Kunststoffadditiven werden dargestellt. Es wird auch ein Überblick über gängige Verfahren zur Kunststoffverarbeitung und deren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften gegeben. Hilfen zur Werkstoffauswahl an konkreten Anwendungsbeispielen geben wertvolle Hinweise für die tägliche Arbeit.

Einfach bestellen: [buch@viewegteubner.de](mailto:buch@viewegteubner.de) Telefax +49(0)611. 7878-420

TECHNIK BEWEGT.

