

UNTERSUCHUNG DES IMPACTVERHALTENS VON CFK-SANDWICHSTRUKTUREN MIT VERSTÄRKTEN SCHAUMKERNEN

T. B. Block, FIBRE, Gebäude IW3, Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen
M. I. Zuardy, FIBRE, Gebäude IW3, Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen
A. S. Herrmann, FIBRE, Gebäude IW3, Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen

Zusammenfassung

Schaumsandwichstrukturen mit CFK-Deckschichten zeigen in Bezug auf Fertigung und Leichtbau hervorragende Eigenschaften zur Anwendung in Primärstrukturen von Flugzeugen. Ihr Schadenstoleranzverhalten, insbesondere das teilweise unzureichend verstandene Impactverhalten, steht dem jedoch bis auf weiteres im Weg. Verstärkte Kernsysteme zeigen einen vielversprechenden Weg zur Verbesserung dieser Eigenschaften, wobei sich bisher auf die Untersuchung des Schadenswachstums im Schaumkern bzw. dem Interface konzentriert wurde. Anwendungen in Primärstrukturen setzen aber auch ein entsprechendes Verständnis der Schadensentstehung unter z. B. einer Schlagstoßbelastung wie auch eines möglichen Wachstums und der diese beeinflussenden Mechanismen voraus.

Dynamische Vorgänge wie Schlagstoßbelastungen können numerisch mit Hilfe der expliziten Finite Elemente Methode simuliert werden. Sandwichstrukturen mit verstärkten Schaumkernen sind dabei eine besondere Herausforderung. Dies liegt einerseits in einem deutlich erhöhten Modellierungsaufwand, der in die Frage mündet, ob eine diskrete oder eine homogenisierte Modellierung der Verstärkungselemente verwendet wird, andererseits in entsprechend längeren Rechenzeiten. Im Falle eines globalen Modells mit entsprechender Strukturantwort erscheint eine homogenisierte Modellierung ausreichend, während bei stärker lokalen Modellen zur Untersuchung von z. B. Schadensmechanismen eine diskrete Modellierung der Verstärkungselemente notwendig ist. In dieser Arbeit werden verschiedene Modellierungs- und Berechnungsansätze für verstärkte Schaumkernsysteme kurz diskutiert und schließlich ein Modellierungsansatz vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt in der Anwendung dieser Modelle zur Beschreibung des Impactverhaltens mittels expliziter, numerischer Simulation. Eine darüber hinausgehende Anwendung der gleichen Ansätze für die Untersuchung von z. B. statischen Problemen oder transienten thermo-mechanischen Problemstellungen ist denkbar.

1. EINLEITUNG

Schaumsandwichstrukturen mit CFK-Deckschichten zeigen in Bezug auf Fertigungskosten und Leichtbau hervorragende Eigenschaften zur Anwendung in Primärstrukturen von Flugzeugen. Hervorzuheben sind hier vor allem eine durch den Einsatz großer, integraler Strukturen vereinfachte Gesamtkonstruktion, die bei erheblich reduzierter Teilezahl entsprechend reduzierte Kosten verbunden mit einer moderaten Gewichtseinsparung erlaubt. Im Bereich von Sekundärstrukturen wie aerodynamischen Verkleidungen (Fairings), Vorflügeln oder der Innenraumausstattung gibt es daher bereits zahlreiche Anwendungen [1].

Das Schadenstoleranzverhalten von Sandwichstrukturen steht einem Einsatz in lasttragenden Strukturen jedoch bis auf weiteres im Weg. Als kritische Punkte sind hier vor allem eine abschätzbare Schadensbildung in Folge von schlagartigen Belastungen, sogenannten Impactlasten, sowie deren Auswirkungen auf die Langzeitintegrität der Struktur zu nennen.

Diese oftmals als sandwichspezifisch angesehene Problemstellung ist in anderen, nicht weniger anspruchsvollen Anwendungsszenarien – hier sei vor allem der Schiffbau und die Windkraftindustrie genannt – für die jeweilige Anwendung zufriedenstellend gelöst worden [2,3]. Dies erlaubt, aus den Anwendungsszenarien zusätzliche Erfah-

rungen gewinnen zu können, auch wenn eine vollständige Übertragung der Ergebnisse auf die Luftfahrt auf Grund der individuellen Anforderungen mit Sicherheit nicht möglich sein wird.

Darüber hinaus gibt es im Bereich der verwendeten Materialien Fortschritte wie z. B. die Entwicklung hochintegrierter Sandwichbauteile mit teilweise verstärkten Kernsystemen zeigt [4-7]. Verstärkte Kernsysteme, sei es mit einer in Form von Pins oder Längsprofilen ausgeführten Verstärkung im Schaumkern, zeigen einen vielversprechenden Weg zur Verbesserung der kritischen Schadenstoleranzeigenschaften von Sandwichstrukturen. Die Erforschung solcher Kernsysteme hat sich bisher weitestgehend auf die Entwicklung der nötigen Fertigungstechnologien einerseits und die Untersuchung der statischen Materialeigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit andererseits konzentriert [8]. Darüber hinaus gibt es Untersuchungen zum Schadenswachstum im Schaumkern bzw. dem Interface [9].

Anwendungen solcher verstärkten Kernsysteme in Primärstrukturen setzen zusätzlich ein entsprechendes Verständnis der Schadensentstehung unter z. B. einer Schlagstoßbelastung wie auch eines möglichen Wachstums und der diese beeinflussenden Mechanismen voraus, so dass in diesem Bereich noch erheblicher Forschungsbedarf besteht [10].

2. IMPACTVERHALTEN VON SANDWICH-STRUKTUREN

Das Impactverhalten von Sandwichstrukturen und die daraus entstehenden Schäden hängen stark von dem jeweils betrachteten Szenario ab. Um allerdings eine allgemeines Level an Robustheit der Struktur gegen Schlagbelastungen sicherzustellen, wie sie bereits in der Fertigung (tool-drop Szenario) oder auch im späteren Einsatz (ramp damage) vorkommen können, werden Testbauteile mit Fallgewichten bei definierten Aufprallenergien belastet.

Die für diese Belastungen betrachteten Schadensszenarien werden in den Bereich der Low-Velocity Impacts mit maximalen Aufprallgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s eingeordnet. Hierfür entwickelte Testmethoden wie z.B. der Compression after Impact (CAI) Versuch [11] werden für Materialproben von sowohl monolithischem CFK als auch Sandwichbauteilen angewandt, wobei ihre Eignung für Sandwichbauteile im Einzelnen noch zu prüfen ist. Hier sind insbesondere die verhältnismäßig große Dicke des Sandwich relativ zu der Fläche der Impactprobe sowie der starke Einfluss der Auflagerbedingungen auf das Schadensbild und die damit resultierende Festigkeit im Druckversuch kritisch zu hinterfragen.

Das Verhalten von Sandwichstrukturen unter einer Impactlast ist sehr unterschiedlich und hängt stark von der gewählten Materialkonfiguration und Sandwichgeometrie ab. In der Kombination sehr steifer Deckschichten aus CFK mit einem Hartschaum wie z.B. PMI-Schaum – besser bekannt unter dem Markennamen Rohacell® – ist im Bereich der nachzuweisenden Impactenergie von mindestens 35J im Wesentlichen zwischen drei verschiedenen Schadensszenarien zu unterscheiden. Als Referenzkonfiguration ist hier ein Sandwich für lasttragende Strukturen z.B. im Rumpf- oder Leitwerksbereich mit einer Deckschichtstärke von 1,5mm bei einer Kernstärke von 25mm anzusehen.

Wird solch eine Konfiguration lokal mit einem stumpfen Impactor und einer Schlagstoßlast von bis zu 35J beaufschlagt, sind prinzipiell drei verschiedene Schadensszenarien zu unterscheiden, wie in BILD 1 von links nach rechts dargestellt. Die drei Schadensszenarien werden im Folgenden erläutert.

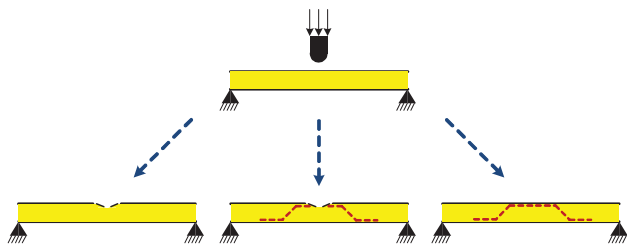


BILD 1. Schadensszenarien einer Schaumsandwichstruktur bei Schlagstoßbelastung

Szenario 1 (links) - lokaler Schaden:

Hierbei erfährt die obere Deckschicht einen lokalen Schaden bestehend aus Faser- und Matrixbrüchen sowie lokal begrenzten Delaminationen. Je nach Deckschichtstärke und Impactorgeometrie kann es zu einem Durchbruch kommen. Zusätzlich entsteht im Schaumkern eine lokale Eindellung, die bei Rückfederung der Deckschicht einen

Hohlraum hinterlässt. Auf Grund der lokalen Schädigung der Deckschicht verbunden mit einer lokalen Eindellung sowie ggf. einem Deckschichtdurchbruch ist allgemein eine gute visuelle Erkennbarkeit des Schadens gegeben.

Szenario 2 (mittig) – lokal, globaler Schaden:

Hierbei erfährt das Bauteil neben der bereits in Szenario 1 beschriebenen lokalen Schädigung von Deckschicht und Kern in Letzterem zusätzlich einen konisch geformten Schubbruch, der bis zur rückseitigen Deckschicht reicht und sich teilweise am Interface der Deckschicht entlang ausbreitet. Ähnlich wie in Szenario 1 ist eine allgemein gute visuelle Erkennbarkeit des Schadens gegeben, allerdings ist die volle Größe des Schadens ohne zusätzliche Maßnahmen wie z. B. Ultraschall nicht festzustellen.

Szenario 3 (rechts) – globaler Schaden:

Bei diesem Impactszenario erfährt die obere Deckschicht keine offensichtlichen, visuell gut erkennbaren Schäden, der darunterliegende Kern wird hingegen durch einen wie in Szenario 2 beschriebenen Schubbruch geschädigt.

Bei Betrachtung der drei geschilderten Schadensszenarien aus Sicht der für Strukturbauteile notwendigen Inspizierbarkeit fällt zunächst einmal auf, dass Szenario 1 am wenigstens kritisch ist, da hier eine gute visuelle Erkennbarkeit gegeben ist und diese auch mit der realen Schadensgröße im Bauteil korreliert. Im Fall von Szenario 2 ist zwar die Erkennbarkeit weiter gegeben, allerdings korrelieren erkennbarer Schaden und vorhandene Schadensgröße im Bauteil nicht miteinander. Am kritischsten ist schließlich Szenario 3 zu sehen, bei dem trotz großer innerer Kernschäden visuell von außen keine erkennbaren Schäden festzustellen sind. Hier wären in jedem Fall zusätzliche Maßnahmen zur Sicherstellung der Inspizierbarkeit zu treffen.

Aus Sicht der Schadenstoleranz ist schließlich für den Kernschaden kein fortschreitendes Wachstum (no-growth capability) unter zyklischer Belastung gefordert. Hierbei sind Szenario 2 und 3 auf Grund der wesentlich größeren Schadensflächen kritischer zu bewerten als Szenario 1, welches nur einen lokalen Kernschaden aufweist. Daher erscheint es erstrebenswert, die Faktoren zu bestimmen, welche zu dem einen oder anderen geschilderten Schadensszenario führen. Ein erster Ansatz wurde hierzu in [12] gemacht. Neben den Auflagerbedingungen, dem Dickenverhältnis der einzelnen Komponenten des Sandwichs zueinander und – wie schon eingangs im Zusammenhang mit derzeit verwendeten Testnormen erwähnt – der Größe der Sandwichprobe hat auch eine Krümmung der Sandwichoberfläche einen Beitrag.

Eine weitergehende Isolation und Quantifizierung dieser Faktoren ist ein langer Prozess. Neben numerischen Untersuchungen hierzu, wie z. B. in [13] vorgestellt, sind auch Experimente notwendig. Dennoch erscheint dies ein erfolgsversprechender Ansatz, um bereits bei der Auslegung von Sandwichstrukturen gezielt unerwünschte Schadensszenarien unterdrücken zu können. Führen die aus einer solchen Untersuchung resultierenden Ergebnisse jedoch zu einem stark eingeschränkten Designspielraum, so erscheinen die bereits angesprochenen verstärkten Kernsysteme neben anderen Vorteilen einen Ausweg aus diesem potentiellen Dilemma zu bieten und werden daher nachfolgend näher untersucht.

3. VERSTÄRKTE KERNSYSTEME

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei verstärkte Kernsysteme vorgestellt, zum einen Pin-verstärkte Schäume und zum anderen Schäume mit integrierten Profilen als Längsversteifung. Die Untersuchung des Impactverhaltens beschränkt sich jedoch auf die Pin-verstärkte Variante, da das zweite Kernsystem mit eingebauten Längsversteifungen noch Gegenstand aktueller Untersuchungen ist. Abschließende Ergebnisse liegen hierzu noch nicht vor.

Zum besseren Verständnis ist in BILD 2 die Prinzipskizze einer Pin-verstärkten Schaumsandwichstruktur dargestellt. Die Pins werden dabei in z-Richtung unter dem Winkel Φ in den Schaumkern eingebracht. Abhängig von der verwendeten Technologie sind die Pins textiles Halbzeug [7] oder wenigstens teilweise vorausgehärtet [5] und bestehen typischerweise ebenfalls aus CFK. Denkbar sind aber auch andere Materialien wie z.B. GFK. Versuche mit metallischen Pins wurden bereits durchgeführt [14]. Die Anbindung an den Schaumkern geschieht dabei formschlüssig und wird im Fall der textil eingebrachten Verstärkungsfasern durch das im Infusionsprozess eingebrachte Harz unterstützt. Wichtig ist neben der reinen Schaumanbindung auch die Anbindung der Pins an die Deckschichten. Diese nehmen die Hauptlasten im Sandwich auf, wobei der Zweck des Kerns und damit auch der eingebetteten Verstärkungen eine zwar meist schubweiche aber möglichst feste Verbindung der beiden Deckschichten ist. Diese Verbindung wird wahlweise über in die Deckschicht hineinragende Pinenden oder abgeflachte, verlängerte Pinfüße erreicht.

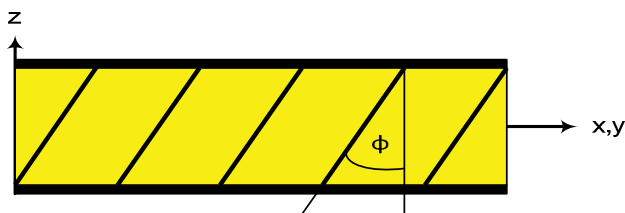


BILD 2. Prinzipskizze einer Pin-verstärkten Schaumsandwichstruktur

Neben Pin-verstärkten Schaumkernen erscheinen auch Längsprofile bestehend aus einem Holm, der durch zwei Gurte am oberen und unteren Ende weiter versteift wird, vielversprechend [4]. Die sich so ergebende Geometrie eines doppelten Ts ist seit Langem bekannt und wird insbesondere in der Bauindustrie aber auch im Flugzeugbau in großer Zahl verwendet.

In der Fertigung werden die textil vorgeformten Halbzeuge zwischen zwei Schaumhälften platziert, wobei vorher an den Rändern des Schaums noch etwas zusätzlicher Platz für die beiden Gurte geschaffen werden muss, da sich sonst die Gurte in der Deckschicht abdrücken. Im Ergebnis ergibt sich so eine integrale Doppelschale mit einem Schaumkern in der Mitte, der in regelmäßigen Abständen durch monolithische Verbindungsstege zwischen den beiden Deckschichten unterbrochen wird. In BILD 3 ist hierzu eine Prinzipskizze dargestellt.



BILD 3. Prinzipskizze einer Sandwichplatte mit integrierten Profilen als Längsversteifung

4. BESCHREIBUNG DES NUMERISCHEN MODELLS

Die Modellierung des verstärkten Kernsystems kann in unterschiedlichen Detailgraden erfolgen. So ist es einerseits möglich den Pin-verstärkten Schaumkern mit diskret formulierten Pins innerhalb des Schaums zu beschreiben. Dabei können die Pins wahlweise als Volumen- oder Balkenelement formuliert werden. Letzteres erscheint bei der Untersuchung größerer Sandwichstrukturen mit deutlich über Tausend Pins vorteilhaft, erfordert allerdings immer noch einen relativ hohen Modellierungsaufwand. Der Rechenaufwand ist durch die relativ einfache Balkenformulierung akzeptabel.

Eine andere Möglichkeit ist es, eine Zweiskalensimulation durchzuführen, bei der einerseits eine sich regelmäßig wiederholende Einheitszelle (EZ) mit hoher Genauigkeit und hohem numerischen Aufwand simuliert wird. Diese EZ wird anschließend unter verschiedenen Lastfällen untersucht und so die homogenisierten Eigenschaften des verstärkten Kernsystems ermittelt. Diese können nun in einem größeren Modell als Ausgangswerte für die Materialkarte des zu beschreibenden verstärkten Kernsystems verwendet werden, ohne dass eine aufwendige diskrete Modellierung der Pins stattfinden muss.

Für die Untersuchung des Impactverhaltens auf der Ebene relativ kleiner Coupon- oder Elementproben erscheint es lohnenswert, die relativ aufwendige aber am Ende genauere diskrete Modellierung der Pins zu wählen. Für die korrekte Beschreibung des Impactverhaltens ist es wichtig, dass die Schadensmechanik im Kernsystem und hier insbesondere die Wechselwirkung zwischen Pins und Schaum ausreichend genau wiedergegeben wird. Daher wurde im Rahmen dieser Untersuchung die diskrete Beschreibung der Pins mittels Balkenelementen einer homogenisierten Beschreibung verwendet. Zur besseren Übersicht sind die diskutierten Ansätze in BILD 4 zusammengefasst dargestellt.


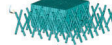

	Einheitszelle (EZ)	Diskrete Pinbeschreibung	Homogenisierter Kern
Modellbeschreibung			
Benötigter Input	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinstmögliche EZ (1 bis 10 Pins) mit sehr hoher Genauigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Coupon oder Element Level Strukturen mit diskreter Beschreibung der Pins 	<ul style="list-style-type: none"> • Detail oder Subkomponente mit verschmierten Kerneigenschaften
Pro	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der EZ • Liefert homogenisierte Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung komplexer Lasten (z.B. Impact) • Bringt tieferes Verständnis der Schadensmechanik 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendbar auf große und komplexe Strukturen • Reduzierter Modellierungs- und Rechenaufwand
Con	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Modellierungsaufwand • Begrenzter Nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Modellierungs- und Rechenaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringeres Verständnis • Verschmierte Kerneigenschaften werden benötigt

BILD 4. Modellierungsansätze für Pin-verstärkte Schaumkerne

Das mit dieser Strategie entworfene Modell zur numerischen Untersuchung des Impactverhaltens wurde mit der expliziten Finite Elemente Software LS-DYNA aufgebaut und gerechnet. Der detaillierte Modellaufbau geschieht dabei weitestgehend analog zu dem bereits in [13] beschriebenen Aufbau eines Modells für eine unverstärkte Schaumsandwichstruktur. Auf die Verwendung von Kohäsivzonelementen in der Deckschicht zur Untersuchung von Delaminationen wurde zu Gunsten einer geringeren Rechenzeit verzichtet [15]. Fokus der Arbeiten ist das Schadensverhalten im Schaum, da dieses für die Schadenstoleranz der Sandwichstruktur am kritischsten zu sehen ist. Zum besseren Verständnis ist das komplette Modell in BILD 5 dargestellt.

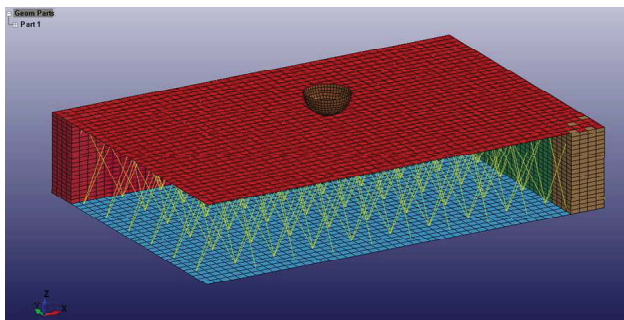


BILD 5. Modell zur Untersuchung des Impactverhaltens Pin-verstärkter Sandwichplatten

Besondere Aufmerksamkeit für eine korrekte Simulation des Impactvorgangs verlangt die Anbindung der Pins an die Deckschichten und die Wechselwirkung zwischen Pins und Schaum. Hierfür ist im ersten Ansatz eine Kopplung der Verschiebungen an den Knoten verwendet worden. Dies hat allerdings zu unrealistischen Ergebnissen geführt, da sich in der Folge die wesentlich steiferen und unter der Impactlast beanspruchten Pins förmlich durch den Schaum geschnitten haben. Die Schaumelemente versagen dabei auf Grund des gewählten Materialmodells vorzeitig, zur Beschreibung des korrekten Schaumverhaltens kann darauf jedoch bis auf Weiteres nicht verzichtet werden. Daher wurde auf eine direkte Kopplung der Verschiebungen zwischen Pins und Schaum im Weiteren verzichtet, für eine korrekte Beschreibung der Kernsteifigkeit aber jeder Pin mit nur einem Balkenelement diskretisiert, so dass ein Ausknicken der Pins an Knoten auf Grund der dann fehlenden seitlichen Stützwirkung des Schaums ausgeschlossen ist.

Der zweite kritische Punkt in der Modellierung ergibt sich bei der Anbindung der Pins an die Deckschicht. Wichtig ist hier einerseits eine ausreichend steife Verbindung, die die auf den Pin wirkenden Kräfte überträgt. Andererseits wurde in Experimenten festgestellt, dass lokal am Impactort auch einzelne Pinanbindungen versagen. Um dieses komplexe Verhalten entsprechend wiederzugeben erscheint es notwendig, eine auf Kohäsivzonelementen basierende Pinanbindung zu verwenden, die für jeden Pin einzeln in der Lage ist, bei Überschreiten einer bestimmten Last Versagen zu initiieren. Dies hilft, wie ein Abgleich zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen im folgenden Kapitel zeigt, den Impactvorgang besser zu beschreiben.

5. VERGLEICH DER NUMERISCHEN UND EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE

Das numerische Modell bildet Versuche nach den in [11] beschriebenen Parametern nach. Die untersuchten Sandwichproben entsprechen dabei der bereits bei der Diskussion der Schadensszenarien beschriebenen Konfiguration. Die zusätzlich eingebrachten Pins bestehen ebenfalls aus CFK und haben bei einem Einbringungswinkel von 30° einen Durchmesser von ca. 2mm. Die Pindichte im Schaumkern ist dabei so gewählt, dass das verstärkte Kernsystem eine Gesamtdichte von 110 kg/m^3 erreicht.

Für eine Überprüfung der gewählten Modellansätze werden die Kraft-Zeit Aufnahmen direkt am Impactkopf mit den in der Simulation ermittelten Verläufen verglichen (BILD 6). Das experimentell festgestellte Schadensverhalten entspricht dabei dem bereits vorab beschriebenen Schadensszenario 1. Hierbei zeigte sich zu Beginn eine bereits akzeptable Übereinstimmung der simulierten Ergebnisse mit den im Versuch bestimmten Werten. Auf Grund eines gut angenäherten Verlaufs des Kraftanstiegs zu Beginn des Impactvorgangs ist von einer korrekten Beschreibung der Gesamtsteifigkeit des Sandwichs im Modell auszugehen.

Abweichend von den Versuchsergebnissen tritt im Modell – erkennbar durch einen auffälligen Zacken im Kraftanstieg zu Beginn des Impactvorgangs – Schaumversagen vor Deckschichtversagen auf. Ob dies analog im Impactversuch passiert, ist zuerst einmal nicht nachvollziehbar. Es fehlt ein derartig klar ausgeprägter Ausschlag in den experimentellen Werten. Allerdings ist eine Krümmung der anfänglich rein linearen Lastanstiegs zu erkennen, so dass von irreversiblen Vorgängen bereits zu diesem Zeitpunkt auszugehen ist. Denkbar ist auch, dass der relativ starke Ausschlag innerhalb des FE Modells ein Effekt der hier notwendigen Diskretisierung ist.

Stark auffällig in den experimentell ermittelten Kraft-Zeit Daten ist, dass nach Erreichen des globalen Maximums bei ca. 2 ms ein sehr schnell eintretender Einbruch der Kontaktkraft stattfindet und auch im weiteren Verlauf ein so hohes Lastniveau nicht mehr erreicht wird. Auf Grund des so deutlichen Einbruchs des Lastniveaus ist hier vom Durchbruch der Deckschicht auszugehen, welches ja auch dem Verhalten nach Schadensszenario 1 entspricht. Ein solcher Einbruch der Last ist in den numerischen Ergebnissen zuerst einmal nicht festzustellen, auch wird kein so hohes Lastniveau erreicht.

Durch Anwendung der im vorangegangenen Abschnitt benannten Kohäsivzonelemente zur Beschreibung des Versagens direkt am Pinfuß, kann das Kraft-Zeit Verhalten besser simuliert werden wie am Vergleich der beiden Kurven in BILD 6 gut zu erkennen ist. Vor Einfügen dieser Elemente direkt am Pinfuß waren alle Pins fest an die Deckschicht angebunden, ein Versagen daher nicht möglich. Diese Beobachtung lässt nun den Schluss zu, dass das Versagen einzelner Pins bzw. deren Anbindung an die Deckschicht für den relativ abrupten Einbruch der Kontaktkraft des Impactors verantwortlich ist. Eine offene Frage bleibt allerdings, ab welcher Last das Versagen auftritt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Versagenslast je Pin auf Basis von Abschätzungen aus [16] definiert. Für genauere Simulationsergebnisse sollte dies in weitergehenden Arbeiten abhängig vom verwendeten Fertigungs-

verfahren untersucht werden.

Weitere erkennbare Abweichungen zwischen den experimentell und numerisch bestimmten Werten gibt es bei der Höhe des erreichten Kraftmaximums, sowie im späteren Verlauf der Kraft-Zeit Kurve, die den Entlastungsvorgang mit Rückfederung des Impactors beschreibt. Hier weicht die simulierte Kurve erkennbar ab.

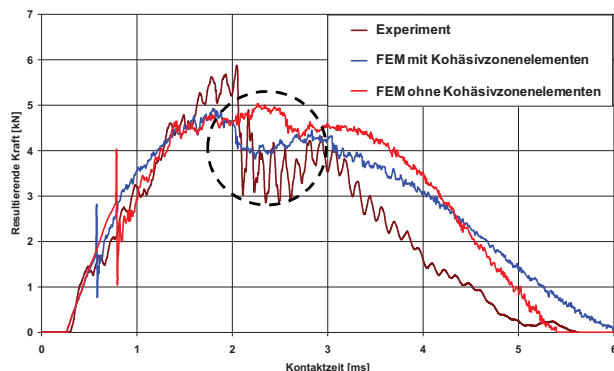


BILD 6. Vergleich zwischen experimentell und numerisch bestimmten Kraft-Zeit Werten bei einer Impactlast von 16J

Das in den Versuchen beobachtete Schadensbild entspricht weitestgehend den im Schadensszenario 1 beschriebenen lokalen Schäden in Deckschicht und Kern. Ein vollständiger Abgleich von Schadensflächen und -bildern zwischen Simulation und Versuch wurde bisher noch nicht durchgeführt. Daher entfällt hier ein entsprechender Vergleich. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die experimentell beobachteten Schadensmodi mit dem entwickelten Modell prinzipiell darstellbar sind. Für eine weitergehende Simulation mit entsprechend erhöhter Genauigkeit sind jedoch umfangreiche parametrische Tests notwendig, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich waren.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

CFK-Schaumsandwichstrukturen bieten ein hohes Potential zur Gewichts- und Kosteneinsparung im Bau von lasttragenden Strukturen im Flugzeugbau. Für einen Einsatz ist jedoch ein besseres Verständnis der unter Impactbelastung entstehenden Schäden notwendig, um die notwendigen Schadenstoleranzanforderungen zu erfüllen. Die Entwicklung einer Übertragungsprozedur für das Impactverhalten von kleinen, einfach geformten Bauteilen auf größere, geometrisch komplexere Strukturen scheint daher notwendig [17]. Verstärkte Kernsysteme bieten über eine aktive Beeinflussung der Eingangs diskutierten Schadensszenarien die Möglichkeit eines individuell angepassten Materialsystems, dass mit lokal eingebrachten Verstärkungen auf die jeweiligen Anforderungen zugeschnitten ist.

Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten wurde auf Grundlage eines numerischen Modells für die Simulation von Impactversuchen an unverstärkten Sandwichplatten ein Modellierungsansatz für Pin-verstärkte Sandwichplatten beschrieben und im Abgleich mit experimentellen Ergebnissen validiert. In ähnlicher Weise wird derzeit an Modellen von Sandwichplatten mit Längsversteifungen gearbeitet,

wie in BILD 7 exemplarisch dargestellt.

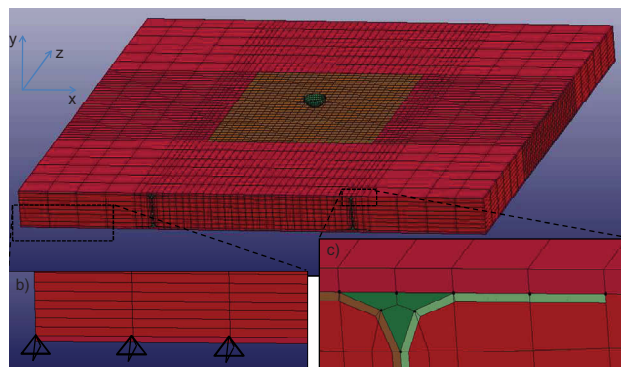


BILD 7. Modell zur Untersuchung des Impactverhaltens von Sandwichplatten mit Längsversteifungen

7. DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung der präsentierten Arbeiten (Förderkennzeichen 20W0605).

8. LITERATUR

- [1] A. S. Herrmann, P. C. Zahlen, I. Zuady: Sandwich structures technology in commercial aviation – present applications and future trends, ICSS 7, Aalborg, 2005.
- [2] C. C. Berggreen: Damage Tolerance of Debonded Sandwich Structures, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 2004.
- [3] D. Zenkert, A. Shipsha, P. Bull, B. Hayman: Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localized damage, Composites Sciences and Technology 65 (2005), 2597-2611.
- [4] P. Zahlen, M. Rinker, C. Heim: Advanced Manufacturing of Large, Complex Foam Core Sandwich Panels, ICSS 8, Porto, 2008.
- [5] T. Carstensen, D. Cournoyer, E. Kunkel, C. Magee: X-Cor advanced sandwich core material, 33rd Int. SAMPE Conference, Seattle, 2001.
- [6] C. Mudra, D. Hachenberg: Alternative Sandwich Core Structures – Efficient Investigation of Application Potential by Using Finite Element Modeling, Sampe Europe, Paris, 2004.
- [7] G. Endres: Innovative Sandwich Constructions for Aircraft Application, ICSS 9, Pasadena, 2010.
- [8] A. I. Marasco, D. D. R. Cartié, I. K. Partridge, A. Rezaei: Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: Out-of-plane properties, Composites Part A 37 (2006), 295-302.
- [9] M. Rinker, P. Zahlen, R. Schäuble: Damage and Failure Progression of CFRP foam-core sandwich structures, ICSS 8, Porto, 2008.
- [10] A. F. Grandt Jr.: Fundamentals of Structural Integrity: Damage Tolerant Design and Nondestructive Evaluation, John Wiley and Sons Inc., 2004.
- [11] Airbus Industry Test Method (AITM) 1.0010 Fibre Reinforced Plastics: Determination of Compression Strength after Impact, Blagnac, 1994.
- [12] M. I. Zuady, P. C. Zahlen, A. S. Herrmann: Skalierungs- und Krümmungseffekt zur Schadenstoleranz

- der CFK-Sandwichbauweise, DGLR, Aachen, 2009.
- [13] T. B. Block, M. Calomfirescu, M. I. Zuardy, A. S. Herrmann: Simulation des Impactverhaltens von CFK-Sandwichstrukturen, DGLR, Aachen, 2009.
 - [14] D. D. Cartié, N. A. Fleck: The effect of pin reinforcement upon the through-thickness compressive strength of foam-cored sandwich panels, *Composites Science and Technology* 63 (2003), 2401-2409.
 - [15] T. B. Block, C. B. Nguyen, M. I. Zuardy, P. C. Zahlen, A. S. Herrmann: Finite Element Analysis of the impact behavior of sandwich structures with pin-reinforced foam cores, accepted abstract, ECCM IV, Paris, 2010.
 - [16] A. I. Marasco: Analysis and evaluation of mechanical performance of reinforced sandwich structures: X-Cor and K-Cor, PhD Thesis, Cranfield University, 2005.
 - [17] M. I. Zuardy, P. C. Zahlen, W. Vöge, A. S. Herrmann: Eine hochentwickelte CFK-Sandwichbauweise für hauptlasttragende Luftfahrtstrukturen, DGLR, Hamburg, 2010.