

1 *Single Cantilever Beam (SCB)*  
Versuch zur Bestimmung der Inter-  
face-Bruchzähigkeit

## SCHADENSTOLERANZ VON HONEYCOMB-SANDWICH- STRUKTUREN

### Motivation

Sandwichstrukturen eignen sich aufgrund ihrer guten Biege- und Beuleigenschaften hervorragend für den ressourceneffizienten Leichtbau. Die gewichtsbezogene Steifigkeit von Honigwabenstrukturen ist in Sandwich-Dickenrichtung besonders groß. Deshalb weisen Sandwichstrukturen mit Honigwabenkern ein sehr hohes Leichtbaupotenzial auf und werden seit Jahrzehnten insbesondere in Luft- und Raumfahrzeugen eingesetzt. Aufgrund der extremen Honigwaben-Leichtbaustruktur besteht der Sandwichkern zu mindestens 95% aus eingeschlossener Luft. Wenn die Sandwichstruktur in ihrem Betrieb wechselnden Umgebungsdrücken und -temperaturen ausgesetzt ist, z.B. während des Starts eines Flugzeugs, wirkt der Druckunterschied zwischen Sandwichkern und Umgebung als zusätzliche mechanische Belastung. Fertigungs- oder betriebsbedingte Fehler

in der Anbindung zwischen Deckschicht und Kern können dazu führen, dass die Deckschicht durch den erhöhten inneren Druck weiter vom Kern abgerissen wird. Dadurch wird die Stabilität der Sandwichstruktur verringert und die Tragfähigkeit der Struktur beeinträchtigt. Deshalb besteht ein großes Interesse an der Bewertung kritischer Fehlergrößen in der Anbindung zwischen Deckschicht und Kern zur Vermeidung einer weiteren Schadensausbreitung im Betrieb, um Design-Richtlinien für die Auslegung und um Inspektionsvorschriften für den Betrieb der Struktur zu definieren.

### Aufgabenstellung

In der Disbonding and Delamination Task Group des Composites Materials Handbook (CMH-17) werden Methoden zur Bewertung der Kritikalität von Deckschichtablösungen in Honigwaben-Sandwich-

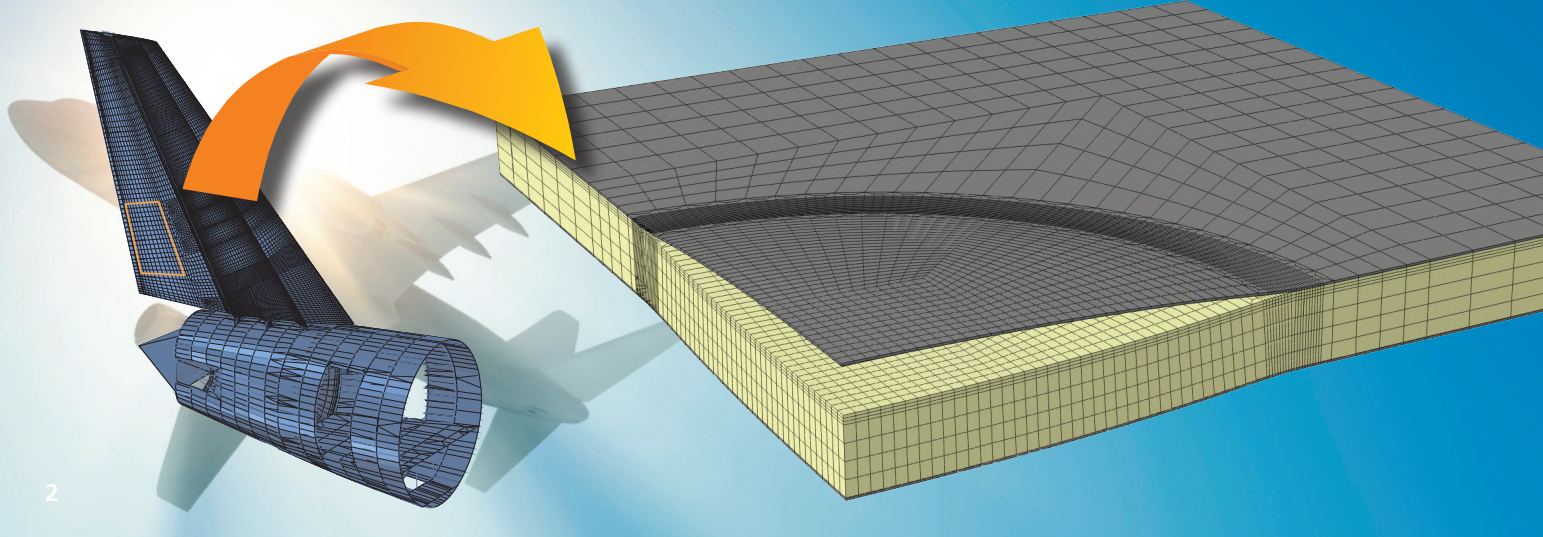
#### Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS

Walter-Hülse-Straße 1  
06120 Halle (Saale)

Ansprechpartner  
Dr. Ralf Schäuble  
Telefon +49 345 5589-151  
ralf.schaeuble@imws.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Ralf Schlimper  
Telefon +49 345 5589-263  
ralf.schlimper@imws.fraunhofer.de

[www.imws.fraunhofer.de](http://www.imws.fraunhofer.de)



2

strukturen entwickelt. Aufgaben des Fraunhofer IMWS sind die Materialcharakterisierung und die Entwicklung von Berechnungsmethoden.

### Charakterisierung des Deckschichtablöseverhaltens

Im Falle einer lokalen Deckschichtablösung erfolgt ein Risswachstum zumeist in, beziehungsweise nahe der Grenzschicht, zwischen der Deckschicht und dem Honigwabenkern. Deshalb wurde ein bruchmechanischer Bewertungsansatz gewählt. Die bruchmechanische Charakterisierung des Deckschichtablöseverhaltens erfolgte mithilfe des Single Cantilever Beam (SCB) Tests (Abb. 1). Der SCB-Versuch ähnelt dem weiter verbreiteten Trommelschälversuch. Wesentliche Vorteile sind

jedoch die realistischere Probenbelastung, der einfache Aufbau und die Eignung auch für Ermüdungsversuche unter Wechsellast.

### FEM-Simulation ground-air druckbelasteter Honeycomb-Sandwichstrukturen

Mithilfe von FEM-Simulationen wurde untersucht, wie sich die Sandwichparameter Deckschichtdicke, Kernhöhe und -dicke sowie der Durchmesser der Deckschichtablösung auf deren Ausbreitungsverhalten auswirken (Abb. 2). Da die Luft im Sandwichkern durch die Deckschichten in einer Kavität eingeschlossen ist, verändert sich der innere Druck sowohl mit der Temperatur als auch durch eine Volumenänderung. Hierdurch ergibt sich eine Druck-Temperatur-Verformungs-Kopplung, die bei der Verformungs- und Beanspruchungsanalyse berücksichtigt werden muss. Zur Abbildung dieses Effekts wurden Fluid-Kavitäten für den Sandwichkern im intakten und im delaminierten Bereich definiert. Während der nichtlinearen Verformungsanalyse werden die realen Innendrucke basierend auf dem allgemeinen Gasgesetz berechnet und mit den Strukturelementen gekoppelt. Schließlich wird für die bruchmechanische Beanspruchungsanalyse der Delaminationsfront die Energiefreisetzungsrates mithilfe der Virtual Crack Closure Technique (VCCT) berechnet.

### Ergebnisse

Während des Aufstiegs eines startenden Flugzeugs auf Reiseflughöhe erzeugt der im

Sandwichkern höhere Druck ein Aufblähen der delaminierten Sandwichstruktur (Abb. 2). Die dadurch entstehende Öffnung der Delamination führt zu einer erhöhten Rissbeanspruchung und damit zur Gefahr einer weiteren Delaminationsausbreitung. Sandwichstrukturen mit dünnen, biegeweichen Deckschichten und großen Anfangsdelaminationen sind am stärksten gefährdet. Die Volumenzunahme beim Aufblähen führt auch zu einer Druckabnahme im Sandwichkern. Mit zunehmender Delaminationsgröße nähert sich der innere Druck asymptotisch dem Umgebungsdruck an (Abb. 3). Durch diese signifikante Belastungsabnahme steigt die Delaminationsbelastung mit zunehmender Größe zunächst an, erreicht aber bei einem bestimmten, sandwichgeometrie-abhängigen Durchmesser ein Maximum (Abb. 4). Liegt die Interface-Bruchzähigkeit über diesem Grenzwert, tritt unabhängig von der Delaminationsgröße keine kritische Ausbreitung ein. Ohne Berücksichtigung der Druck-Temperatur-Verformungs-Kopplung würde die Delaminationsbelastung unrealistisch hoch berechnet und das Strukturverhalten falsch vorhergesagt werden.

2 Simulation der ground-air Druckbelastung von Honeycomb-Sandwichstrukturen während des Flugzeugaufstiegs auf Reiseflughöhe

3 Druckabnahme im Sandwichkern aufgrund starker Verformungen bei großen Delaminationen

4 Delaminationsfrontbelastung in Abhängigkeit von der Delaminationsgröße

