GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON SCHAUM-SANDWICH-BAUWEISEN IN DER LUFTFAHRT

M. A. Roth, F. Goldmann
Evonik Röhm GmbH
Kirschenallee, 64293 Darmstadt, Deutschland

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Vortrages werden die speziellen Anforderungen an Kernmaterialien bestehend aus polymeren Hartschäumen, Auslegungs- und Gestaltungsmethoden, Herstellungsverfahren, NDT- und Reparaturmethoden sowie Einsatzgebiete von Schaum-Sandwich-Strukturen für Luftfahrtanwendungen aufgezeigt. Für die Zulassung und Qualifikation von Kernmaterialien müssen verschiedene Prüfungen am Werkstoff selbst, auf Coupon-Ebene bis hin zum fertigen Bauteil durchgeführt werden, wodurch viele Anforderungen an das Kernmaterial erfüllt werden müssen, um im späteren Flugbetrieb sicher eingesetzt werden zu können. Darüber hinaus gibt es verschiedene Gestaltungsmethoden um Sandwich-Bauweisen auszuführen. Je nach Anwendungsfall kann die optimale Bauweise unter Verwendung von analytischen oder auch numerischen Berechnungen mittels Finite-Elemente-Methoden oder anhand von Bauteiltests ermittelt werden. Für analytische und numerische Berechnungen existiert ein Versagenskriterium für PMI-Hartschaumstoffe, welches unter Verwendung von gängigen Kalkulationsprogrammen eingesetzt oder in FE-Programme implementiert werden kann. Dank der exzellenten Festigkeit und Steifigkeit bei geringer Dichte können Hartschaumstoffe einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Festigkeit eines Bauteils leisten. Schaum-Sandwich-Strukturbauteile können in der Prepreg-Autoklav-Technologie oder mit allen üblichen Liquid-Composite-Moulding-Verfahren, z. B. RTM, VARI , kostengünstig hergestellt werden. Sowohl für die Sicherung des Fertigungsprozess als auch zur Inspektion des Bauteils im Betrieb können verschiedene NDT-Methoden für Schaum-Sandwich-Strukturen eingesetzt werden. Anhand ausgewählter Beispiele kann gezeigt werden, dass verschiedenartige Schäden in Schaum-Sandwich-Strukturen mit herkömmlichen NDT-Methoden detektiert werden können. Ausgewählte Beispielen zeigen, welche Schädigungen im Betrieb auftreten können und wie diese mit speziellen Reparaturmethoden wieder Instand gesetzt werden können. Schaum-Sandwich-Strukturen kommen heutzutage in verschiedenen Luftfahrtanwendungen, z. B. Druckkalotte, Außen- und Innenverkleidungsteile, bereits erfolgreich zum Einsatz.

1. EINLEITUNG

Im Flugzeugbau wird die traditionelle Metallbauweise zunehmend durch Faser-Kunststoff-Verbunde, insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, substituiert. Bereits der Airbus A350 bzw. Boeing 787 soll zu über 50 % aus CFK bestehen. Im Bereich der Hochleistungsfaserkunststoffverbunde kommen sowohl monolithische Strukturen als auch Sandwich-Konstruktionen zum Einsatz. Ein Sandwich-Verbund besteht neben den dünnen, hochsteifen und -festen Deckschichten aus einem meist dicken Kern geringer Dichte [1]. Die Sandwich-Bauweise bietet sich im Allgemeinen für auf Biegesteifigkeit und -festigkeit gewichtsoptimierte Bauteile an. Ebenso kann mittels der Sandwich-Bauweise die Beul- bzw. Knickstabilität von dünnwandigen Strukturen erheblich gesteigert werden.

2. POLYMERE HARTSCHAUMSTOFFE

2.1. Aufbau

Grob lassen sich die polymeren Schaumstoffe in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere einteilen [2]. Für den Einsatz als Kernwerkstoff in Sandwich-Bauteilen in der Luftfahrt ist letztere Kategorie in aller Regel uninteressant. Neben den intrinsischen Eigenschaften des eingesetzten Ausgangswerkstoffs ist insbesondere die geometrische Schaumstruktur für die Eigenschaften von Bedeutung. Hierunter versteht man unter anderem die Größe und Form der Zellen und die Homogenität ihrer Struktur, den Aufbau der Zellwände, und die Materialdickenverteilung innerhalb der Zellwand. Diese Faktoren beeinflussen neben den mechanischen Kennwerten auch weitere für den Einsatz relevante Charakteristika. Die Zellgröße beeinflusst etwa die Harzaufnahme während der Bauteilfertigung und die Qualität der Anbindung an die Deckschichten entscheidend.

2.2. Eigenschaften

Zur Charakterisierung von Hartschäumen als Konstruktionswerkstoffe eignen sich unter anderem ihre mechanischen Festigkeitswerte sowie ihre Wärmeformbeständigkeiten. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Schub- und Druckfestigkeiten von gebräuchlichen Schaumkernwerkstoffen.

Schaumtyp	Nominelle Dichte [kg/m³]	Schub-festigkeit [MPa]	Druck-festigkeit [MPa]
PMI (ROHACELL® 51 WF)	52	0,80	0,80
PET (DIAB Divinycell® P60)	60	0,55	0,35
PES (DIAB Divinycell® F50)	50	0,60	0,40
PEI (Airex® R82.60)	60	0,80	0,70
PVC cross-linked (Airex® C71.55)	60	0,85	0,95
Polyurethan	50	0,30	0,40

TAB 1. Typische Eigenschaften von verschiedenen Schaumwerkstoffen

2.3. Prüfmethoden

Zur Bestimmung der in Kapitel 2.2. genannten Eigenschaften sind in der Regel Prüfungen am reinen Kernwerkstoff ausreichend. Einige Eigenschaften eines Schaumkerns sind allerdings abhängig von den anderen Komponenten der Sandwich-Struktur, dem Herstellungsprozess sowie der Größe und Geometrie des Sandwich-Teils und anderen nicht werkstoffgebundenen Parametern. Deswegen müssen diese Eigenschaften im Verbund als Coupon, Strukturdetail oder sogar im fertigen Bauteil selbst ermittelt werden. Allgemein wird jedoch angestrebt, einen möglichst großen Anteil der Prüfungen an möglichst einfachen Probekörpern durchzuführen, um den Prüfaufwand zu minimieren [3]. Im Idealfall nimmt die Anzahl der durchgeführten Prüfungen mit zunehmender Probekörperkomplexität ab, so dass sich die in Bild 1 dargestellte „Prüfpyramide“ ergibt.

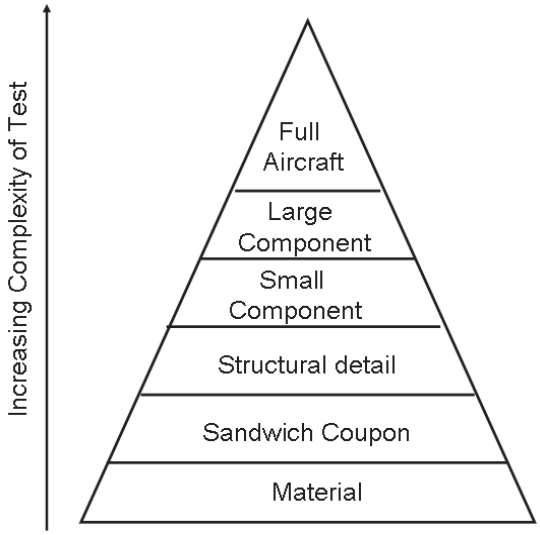


BILD 1. Prüfpyramide

Eine analoge Aufwandsverteilung kann für die numerische Simulation des Werkstoffverhaltens formuliert werden. Auch hier zieht eine zunehmende Komplexität der simulierten Geometrie einen exponentiell steigenden Rechenaufwand nach sich. Durch Minimierung der Geometriekomplexität lässt sich also der Aufwand signifikant reduzieren.

3. AUSLEGUNGS- UND GESTALTUNGSMETHODEN

Im Bereich der Hochleistungsfaserkunststoffverbunde kommen sowohl monolithische Strukturen als auch Sandwich-Konstruktionen zum Einsatz. Die Wahl der optimalen Bauweise ergibt sich als Kompromiss von verschiedenen Rahmenbedingungen, wie z. B. die Sicherstellung einer belastungs-, werkstoff- und fertigungsgerechten sowie wirtschaftlichen Konstruktion. Dazu zählen die mechanischen Belastungen aus dem Service, definiert im Lastenheft, die gewünschte Bauteilgeometrie (z. B. zur Erzeugung aerodynamischer Flächen), Grad der Integration von Unterbaugruppen sowie der gewählte Härteprozess.

Neben der Sicherstellung der Funktion müssen die zulässigen Bauteilkosten und das angestrebte Bauteilgewicht eingehalten werden. Nicht zuletzt können Kosten durch nachgelagerte Fertigungsstufen wie Montage, Bauteilprüfungen (NDT = Non-Destructive-Testing) und Lackierung erheblich sein, wenn eine scheinbar günstige Bauweise hier Mehraufwand verursacht. Andererseits können durch die gute Oberflächenqualität einer Schaum-Sandwich-Struktur (kein Telegraphing-Effekt wie etwa bei Wabenkernen) erhebliche Einsparungen in der Oberflächenvorbereitung für die Lackierung erreicht werden.

Im Allgemeinen bietet sich die Sandwich-Bauweise für auf Biegesteifigkeit und -festigkeit gewichtsoptimierte Bauteile an. Zusätzlich kann das Beulverhalten eines Strukturbauteils durch Verwendung der Sandwich-Bauweise deutlich verbessert werden.

Zur Auslegung des Schaumkerns von Sandwich-Strukturen empfiehlt sich der Einsatz eines geeigneten Festigkeitskriteriums, womit die Materialanstrengung des Kernmaterials bestimmt werden kann. Für PMI-Hartschaumstoffe existiert bereits ein dreidimensionales Festigkeitskriterium, welches vom Deutschen Kunststoff-Institut in Darmstadt entwickelt worden ist und einfach in herkömmliche FE-Programme implementiert werden kann (siehe Bild 2). Dieses Kriterium berücksichtigt die Kompressibilität und die Festigkeitsunterschiede zwischen Zug-, Druck- und Schubbelastung von Hartschaumstoffen [4].

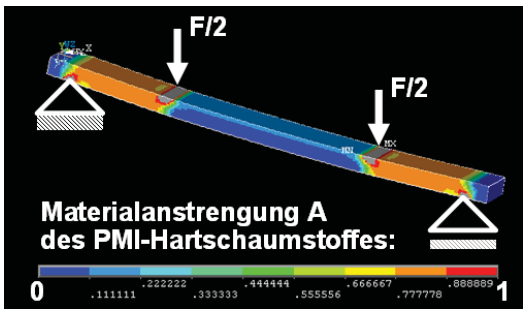


BILD 2. FE-Ergebnis der Materialanstrengung des Kernmaterials unter 4-Punkt-Biegebelastung eines Sandwich-Balkens

In Sandwich-Strukturen werden an den Kern die folgenden Anforderungen gestellt:

- Deckschichten auf Abstand halten zur Erhaltung der geometrischen Steifigkeit
- Übertragung der notwendigen Schubkräfte in Quer-/Ebenenrichtung
- Stabilisierung der meist dünnen Deckschichten zur Vermeidung von lokalem Beulen
- Einfache und exakte Herstellung der Kerngeometrie durch z. B. spanende Bearbeitung und/ oder Thermoformen
- Prozessstabilität und -sicherheit in Bezug auf Druck- und Temperaturbelastung während des Aushärtens des Sandwich-Verbunds inkl. der Deckschichten
- Gute Anbindung an die Deckhäute bei geringer Harzaufnahme (Geschlossenzelligkeit)
- Möglichkeit zur automatisierten Ablage (Roboter)
- Sonstiges, wie z. B. akustische und thermische Isolation

Im Allgemeinen sind drei verschiedene Sandwich-Bauweisen gebräuchlich (siehe Bild 3): Voll-Sandwich, Haut-Sandwich und Schalenbauweise mit Sandwich-Profilversteifung [5].

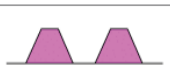
Bauweisenkonzept	Skizze	Steifigkeit	Gewicht	Layup-Aufwand	Fügeaufwand
Voll-Sandwich		++	+	++	++
Haut-Sandwich		+	++	+	0
Schalenbauweise mit Sandwich-Profilversteifung		+	+	+	++

BILD 3. Sandwich-Bauweisen im Überblick

3.1. Voll-Sandwich-Bauweise

Bei der Voll-Sandwich-Bauweise ist das Innere des Bauteils vollständig mit dem Kernwerkstoff ausgefüllt. In der Regel wird ein zweiseitiges geschlossenes Werkzeug verwendet, in dem das Bauteil in einem Co-Curing-Prozess gefertigt wird. Als Ausgangsmaterial für die Deckschichten können sowohl trockene Faserlagen mit einem Infusionsprozess als auch Prepregs eingesetzt werden. Der Kern muss für Voll-Sandwich-Bauteile besonderen Ansprüchen genügen: Er sollte geometrisch präzise vorgefertigt sein und im Idealfall unter Härtetemperatur einen ausreichenden Werkzeuginnendruck erzeugen, um eine gleichmäßige und gute Konsolidierung der Deckschichten zu ermöglichen. In einigen Fällen dient die Kernkomponente auch als Lehre zum Anlegen von integrierten Funktionselementen. So werden beispielsweise bei Hubschrauberrotorblättern Trimmkammern und andere Einlegeteile bei der Montage vor der Aushärtung im Schaum platziert, um eine genaue Positionierung zu erreichen.

Auch Gelegepakete zur Erzeugung von massiven Lasteinleitungsbereichen lassen sich an den geschäfteten Kern millimetergenau anlegen, was den Lege-/ Positionierungsaufwand erheblich reduziert.

Im Einsatz sind die Aufgaben des Kerns neben der Übertragung von Schubkräften insbesondere die Stabilisierung der Deckschichten gegen Beulen und Knicken. Bild 4 zeigt ein Voll-Sandwich-Bauteil im Querschnitt.

BILD 4. Voll-Sandwich-Bauteil mit aus mehreren Schichten zusammengesetztem Kern

3.2. Haut-Sandwich-Bauweise

Hautsandwichbauteile bestehen aus einer mit einem dünnen Kern versteiften Schale und Rippen sowie ggf. Holmen (vgl. Bild 5). Der Kern unterbindet wie beim Voll-Sandwich lokales Beulen und ermöglicht so beispielsweise die Stabilisierung aerodynamisch beanspruchter Oberflächen, indem er Lasten senkrecht zur Bauteiloberfläche aufnimmt.

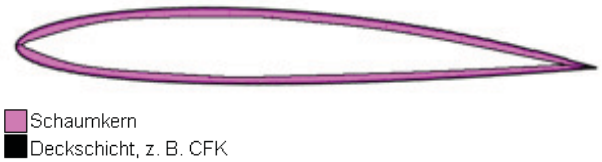


BILD 5. Schematische Darstellung eines Haut-Sandwich-Bauteils

Die Herstellung der Außenhaut der Haut-Sandwich-Bauteile erfolgt meist in einseitigen Formen, in denen die zwei Schalen getrennt hergestellt werden. Die Montage mit den Rippen findet in einem anschließenden Fügeprozess statt.
Zur Herstellung der Außenhaut können wiederum Prepreg-Autklav, Infusions- oder auch Injektions-Verfahren eingesetzt werden.
Nachteilig ist der aus der Differentialbauweise resultierende erhöhte Montageaufwand. Neben dem Shimmen (Toleranzausgleich mit Ausgleichsmasse) und Kleben kommt meist noch ein Nietprozess hinzu. Als Vorteil zu sehen ist, dass im Falle von mangelhaften Einzelteilen nicht das ganze Bauteil verloren geht, sondern nur das betreffende Fügeteil.

3.3. Schalen-Bauweise mit Sandwich-Profilversteifungen

Schalen (monolithische dünnwandige Bauteile) werden mit Profilen versteift, um ein Stabilitätsversagen, insbesondere unter Druckbeanspruchung, zu vermeiden. Durch die Verwendung einer partiellen Versteifung kann die Eigensteifigkeit und somit auch die Laminatdicke des monolithischen Bereichs oft deutlich reduziert und so das Bauteilgewicht gesenkt werden. Aus prozesstechnischer Sicht bieten sich insbesondere Ω-Stringer-Profile an, die bei der Herstellung verhältnismäßig schnell belegt und problemlos integral in einem Co-Curing-Prozess gefertigt werden können. Bild 6 zeigt ein Beispiel für eine Ω-Sandwich-Profilversteifung.

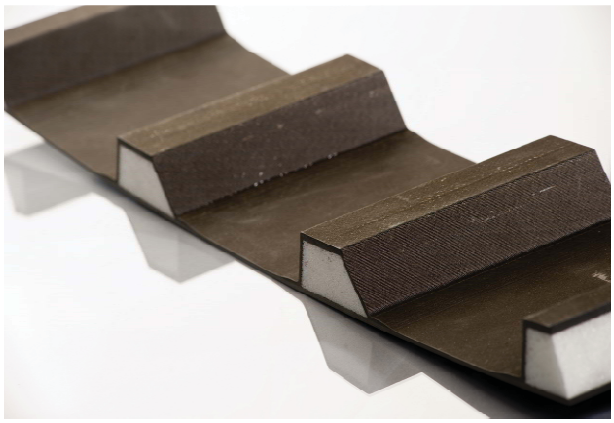


BILD 6. Ω-Profilversteifung im Querschnitt

4. HERSTELLUNGSVERFAHREN

Polymere Schaumstoffe zeichnen sich durch gute bis sehr gute gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften aus. Darüber hinaus lassen sich polymere Schaumstoffe durch Fräsen, Bohren, Stanzen, Drehen etc. mit herkömmlichen Werkzeugen bearbeiten und preisgünstig thermisch verformen. Hochtemperaturbeständige und druckfeste Schaumstoffe, wie z. B. PMI-Hartschaumstoffe, können einerseits als Fertigungshilfsmittel in der Flecht-, Wickel- und Preformtechnologie sowie als Drapierhilfe zur Realisierung von Profil-versteiften Schalen und andererseits als lasttragender Strukturkern in Sandwich-Bauweisen eingesetzt werden. Dieser polymerer Hartschaumstoff kann geklebt oder mithilfe von Druck und Wärme dauerhaft mit allen herkömmlichen duro- oder thermoplastischen Kunststoffen zu extrem belastbaren Werkstoffverbunden verarbeitet werden. Die hohe Wärmeformbeständigkeit dieses Schaums und die besondere Kriechbeständigkeit ermöglichen eine sehr gute Konsolidierung der Faser-Kunststoff-Verbund-Deckschichten während der Verarbeitung und sehr kurze Produktionszykluszeiten. Die Verarbeitung kann bei Temperaturen bis zu 235 °C und einem Druck bis 0,7 MPa über mehrere Stunden erfolgen. Alle herkömmlichen Verarbeitungsverfahren, wie Flüssigimprägnierung (z. B. RTM, VAP, MVI, SLI, Quickstep etc.), Prepreg-Autoklav-Technik, Wickeln, Tapelegen und Presstechnik können eingesetzt werden. Die Porenstruktur ist 100 % geschlossenzellig, wodurch nur die an der Oberfläche angeschnittenen Poren mit Harz gefüllt werden. Dies spart nicht nur unnötiges Gewicht durch einfließendes Harz sondern sorgt auch für eine ausreichende Anbindung an die Deckschichten. Z. B. gibt es PMI-Hartschaumstoffe in verschiedenen Grades, wie WF, RIST und RIMA, die sich hauptsächlich durch die Größe der Poren und somit der Harzaufnahme unterscheiden. Durch den Einsatz von hochtemperaturbeständigen Hartschaumstoffen können die Aushärtung der Deckschichten und die Verklebung des Kernmaterials mit den Deckschichten in einem Fertigungsschritt (Co-Curing-Process) erfolgen. Zudem müssen Rand- und Krafteinleitungsbereiche nicht gesondert ausgespachtelt werden. Ein Abzeichnen der Kernstruktur bei Verwendung von sehr dünnen Deckschichten tritt aufgrund der sehr homogenen Porenstruktur ebenfalls nicht auf, wodurch Spachtelarbeiten vor dem Lackieren der Sandwich-Struktur nicht notwendig sind. All dies führt zu einer Reduzierung der Fertigungsschritte und -zeiten sowie der bauteilbezogenen Fertigungskosten.

5. NDT-PRÜFMETHODEN

Sowohl zur Inspektion der gefertigten Bauteile nach der Herstellung als auch zur regelmäßigen Prüfung während des Einsatzes ist die Verwendung von zerstörungsfreien Prüfmethoden (non-destructive testing, NDT) üblich. Zu den potentiellen während der Fertigung verursachten Bauteilfehlern zählen zum einen Ungänzen der Deckschicht, wie Porösitäten und Fremdkörpereinschlüsse. Zum anderen sind Fehler im Bereich der Anbindung des Kerns an die Deckschichten oder im Kern selbst möglich. Beschädigungen, die während des Betriebs auftreten können, sind beispielsweise Impactschäden.

Die Wahl eines geeigneten NDT- Verfahrens hängt von verschiedenen Voraussetzungen ab. Neben dem Design und der Zugänglichkeit der zu untersuchenden Struktur ist dies vor allem das erwartete Schadensbild. In Frage kommen beispielsweise verschiedene ultraschallgestützte Verfahren oder Shearografie. Ein ultraschallgestütztes Verfahren ist die Durchschallung. Dabei wird auf der einen Seite der Struktur durch einen Sender ein Ultraschallsignal generiert und in das Bauteil eingebracht. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein Empfänger, der das angekommene Signal auffängt. Befindet sich im Bauteil zwischen Sender und Empfänger eine Fehlstelle, so wird der das Bauteil durchdringende Schallimpuls gestreut und so das vom Empfänger aufgenommene Signal stärker reduziert als in intakten Bereichen. Bild 7 skizziert die Funktionsweise des Verfahrens.

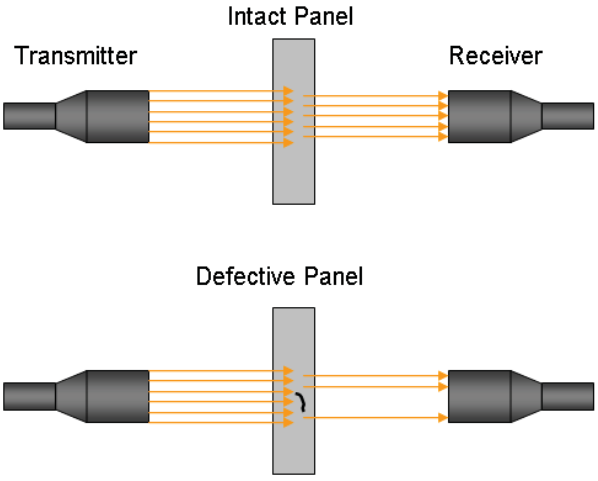


BILD 7. Ultraschall-Durchschallung

Das Impulsechoverfahren ist ein weiteres NDT-Verfahren, das Ultraschallwellen nutzt. Allerdings wird hier die Reflektion des Ultraschallimpulses an glatten Grenzflächen zwischen verschiedenen Medien genutzt. Das von der Sender- / Empfängereinheit erzeugte Signal wird an der Rückwand einer monolithischen Struktur reflektiert, das entsprechende Echo wird aufgefangen. Porösitäten oder sonstige Fehler in der Struktur schwächen das empfangene Echo ab oder erzeugen ein Echo, das früher empfangen wird als das an der Rückwand entstandene. Schematisch wird das Impulsechoverfahren in Bild 8 dargestellt.

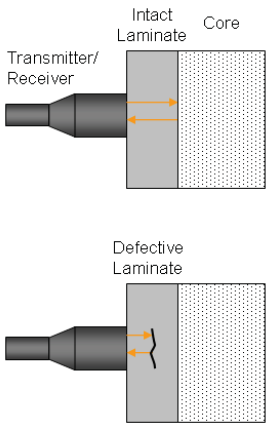


BILD 8. Impulsechoverfahren

Dieses Verfahren kann sowohl für monolithische Strukturen als auch für Schaumsandwichstrukturen verwendet werden. Voraussetzung ist allerdings eine sehr feine Zellstruktur des Schaums, da die mit einer groben Zellstruktur einhergehende Rauhigkeit der Grenzfläche zwischen Schaumkern und Deckschicht den Echoimpuls bereits so stark streut, dass eine sichere Schadensdetektion nicht möglich ist. Da sich mit diesem Verfahren aus der Laufzeit des Signals zwischen Erzeugung des Impulses und Empfang des Echos auch die Laminatdicke bestimmen lässt, bietet es sich besonders für die Kontrolle des Laminats im Rahmen der Qualitätssicherung nach der Fertigung an.

Die Shearografie ist ein optisches Verfahren, das die aus mechanischen Strukturdefekten resultierenden Verformungen der Bauteiloberfläche grafisch erfasst. Das zu untersuchende Bauteil wird durch einen aufgeweiteten Laserstrahl beleuchtet, der an der Oberfläche reflektiert und durch ein Scherelement aufgefangen wird. Durch das Scherelement werden zwei zueinander in der Bildebene verschobene Bilder der Oberfläche erzeugt. Anhand des daraus generierten Interferogramms wird der Defekt sichtbar. Mit der Shearografie lassen sich relativ große Oberflächen untersuchen. Deswegen ist sie auch für die Inspektion größerer Bauteile geeignet.

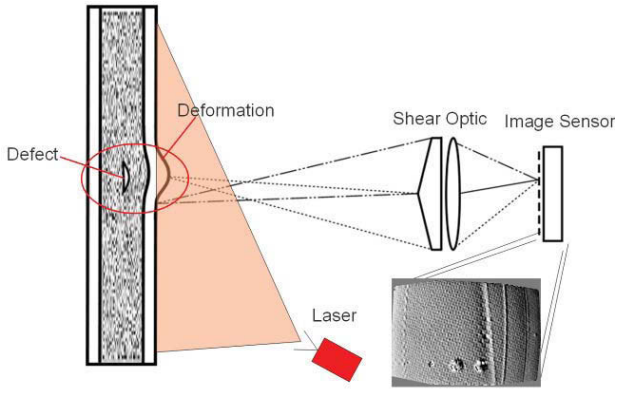


BILD 9. Shearografie

6. REPARATURMETHODEN

Infolge unsachgemäßer Handhabung während der Produktion und/ oder der herrschenden Belastungen im Betrieb, wie z. B. Vogelschlag, können Schäden in der Schaum-Sandwich-Strukturen entstehen. Diese Schäden müssen unter Verwendung von geeigneten Reparaturmethoden schnell und kostengünstig beseitigt werden können (siehe Bild 10). Zunächst wird der geschädigte Bereich der Deck- und Kernschicht entfernt (Schritt 1). Bei kleinen Schäden wird der geschädigte Bereich des polymeren Hartschaumstoffs ausgespachtelt (Schritt 2). Bei mittleren bis größeren Schäden wird der geschädigte Bereich des Kernmaterials durch ein eingeklebtes Ersatzkernmaterial (Plug-In) substituiert (Schritt 2). Anschließend wird das Deckschichtmaterial unter Verwendung einer Schäftung und unter Einhaltung des erforderlichen Laminataufbaus wieder aufgebaut.

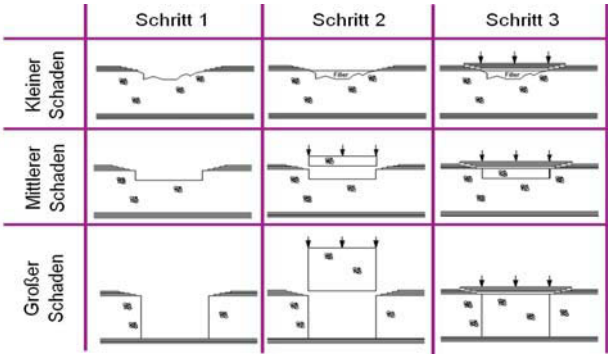


BILD 10. Reparaturmethode von Schaum-Sandwich-Strukturen

7. EINSATZGEBIETE

Schaum-Sandwich-Strukturen kommen heutzutage in den folgenden Anwendungsgebieten zum Einsatz:
- Luft- und Raumfahrt
- Kraftfahrzeugbau, z. B. Verkleidungsteile, Bodenplatte
- Schienenfahrzeugbau, z. B. Boden-Paneele, Frontend
- Schiffsbau, z. B. Interieur, Rumpf
- Transportwesen, z. B. Behälter, Container
- Windenergieanlagen, z. B. Rotorblätter
- Medizin, z. B. Röntgenliegen
- Sport, z. B. Fahrrad-Laufräder, Langlaufski

Zum Beispiel werden Schaum-Sandwich-Strukturen in der Luft- und Raumfahrt in der Druckkalotte der A340/ A380, Landeklappen und Triebswerksverkleidungen der MD 11, Hubschrauber-Rotorblättern der EC 135 u. v. m. erfolgreich eingesetzt.

8. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Zenkert, D. (Editor): The Handbook of Sandwich Construction. London, United Kingdom: Engineering Materials Advisory Services Ltd., 1997
[2] Gibson, L. J.; Ashby, M. F.: Cellular solids: structure & properties. Cambridge university press, 1997
[3] Wiedemann, M.: CFK: Status der Anwendung und Produktionstechnik im Flugzeugbau. DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 2009
[4] Roth, M. A.; Kraatz, A.: New 3-D Failure Criterion for Sandwich Foam Cores based on PMI. 8th

International Conference on Sandwich Structures, Porto, Portugal, 2008.

[5] Roth, M. A.; Goldmann, F. A.: Sandwich-Bauweisen – Funktionsprinzip und Konstruktionsweisen von Sandwich-Strukturen. Lightweightdesign Die Zeitschrift für den Leichtbau bewegter Massen. Ausgabe 2/2009, 2009, Seite 36 – 40.