

IMPACTVERHALTEN UNTERSCHIEDLICHER FVW-BAUWEISEN UND FERTIGUNGSTECHNIKEN

H. Wagner, K. Drechsler
Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart,
Deutschland
H. Bansemer, Eurocopter Deutschland GmbH, 81663 München, Deutschland

Zusammenfassung

Das Ausmaß der Schadensfläche nach Impact an einer Faserverbundstruktur wird von vielen Faktoren beeinflusst. Der Einfluss unterschiedlicher Faserwerkstoffe auf das Impactverhalten wird untersucht. Hierzu werden die während Impact mit Hilfe einer Kraftmessdose aufgezeichneten Kraft-Zeit Verläufe analysiert und ausgewertet. Aus den Kraft-Zeit Verläufen werden die Geschwindigkeits-Verläufe abgeleitet. Die Schadensfläche nach Impact wird zerstörungsfrei geprüft und mit den Erkenntnissen aus den Kraft-Zeit bzw. Geschwindigkeits-Zeit Verläufen in Verbindung gebracht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Steifigkeit und die Energieaufnahme des jeweiligen Faserwerkstoffes das Impactverhalten maßgeblich beeinflussen. Am Beispiel von Wellen wird gezeigt, dass mit Hilfe der Nähetechnik das Impactverhalten einer Faserverbundstruktur verbessert werden kann. Das Vernähen des trockenen Preforms reduziert die Schadensfläche und erhöht die Restfestigkeit nach Impact.

1. EINLEITUNG

Schlagbelastungen auf faserverstärkte Materialien können folgeschwere Schäden in einer Struktur verursachen. Neben Faser- und Matrixbrüchen können weitflächige Delaminationen entstehen, die die Festigkeit einer Faserverbundstruktur zum Teil erheblich reduzieren. Um das Impactverhalten unterschiedlicher Materialien zu vergleichen, wird der nach DIN EN 6038 genormte CAI (Compression After Impact) Versuch verwendet. Hierbei werden Probekörper mit Abmessungen von 150mm x 100mm x 4mm in einer Versuchsvorrichtung fixiert und mittels eines Fallbolzen in der Mitte mit einem Impact beaufschlagt. Eine Kraftmessdose am Impactor zeichnet den Kraft-Zeit Verlauf auf. Abhängig von der gewählten Fallhöhe kann das Impactverhalten eines Werkstoffes bei unterschiedlichen Energien analysiert werden. Experimentelle Versuche auf Basis von CAI Probekörpern mit unterschiedlichen Materialien haben gezeigt, dass der Faserwerkstoff maßgeblich die Impacteigenschaften einer Faserverbundstruktur beeinflusst [1,2].

2. EINFLUSS DES FASERWERKSTOFFES AUF DAS IMPACTVERHALTEN

TAB 1 zeigt Eigenschaften unterschiedlicher Verstärkungsfasern. Neben der Steifigkeit und Festigkeit des Faserwerkstoffes sind Kennwerte bzgl. Bruchdehnung und Energieaufnahmevermögen aufgelistet. Die Bruchdehnung und das Energieaufnahmevermögen wurden unter Annahme von linear elastischem Verhalten bis zum Bruch auf Basis von Steifigkeit und Festigkeit für die jeweilige Faser berechnet.

E-Glasfasern zeigen im Vergleich zu Kohlenstofffasern eine bedeutend geringere Steifigkeit. Das Energieaufnahmevermögen bis zum Bruch liegt bei E-Glasfasern aufgrund der hohen Bruchdehnung deutlich

über dem von Kohlenstofffasern. IMS Kohlenstofffasern besitzen mit Abstand die höchsten Werte hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit der in TAB 1 aufgeführten Fasermaterialien. Ihre Bruchdehnung liegt leicht über der von HTA bzw. HTS Fasern. Das Energieaufnahmevermögen von IMS Fasern liegt zwischen dem von E-Glasfasern und HTA bzw. HTS Kohlenstofffasern.

TAB 1. Eigenschaften unterschiedlicher Verstärkungsfasern [3,4]

	E-Glas	Kohlenstofffaser HTA / HTS	Kohlenstofffaser IMS
Steifigkeit [N/mm ²]	73 000	238 000 / 240 000	290 000
Zugfestigkeit [N/mm ²]	3400	3950 / 4300	5600
Bruchdehnung [%] (berechnet aus Steifigkeit und Zugfestigkeit)	4,7	1,7 / 1,8	1,9
Spez. Energieaufnahmevermögen [N/mm ²] (berechnet aus Zugfestigkeit und Bruchdehnung)	7918	3278 / 3852	5400

Zur Analyse und Bewertung des Impactverhaltens der in TAB 1 aufgelisteten Fasermaterialien wurden CAI Probekörper gefertigt und nach Impact mittels Ultraschall zerstörungsfrei geprüft. Für die Herstellung der Probekörper wurden die in TAB 2 aufgelisteten Faserhalbzeuge verwendet.

TAB 2. Faserhalbzeuge zur Herstellung der CAI Probekörper

Bezeichnung	Faserwerkstoff	Aufbau	Flächengewicht
Gelege CFK/HTS/540	Kohlenstofffaser Tenax HTS	$\pm 45^\circ$	540 g/m ²
Gelege CFK/HTA/540	Kohlenstofffaser Tenax HTA	$\pm 45^\circ$	540 g/m ²
Gelege CFK/HTS/254	Kohlenstofffaser Tenax HTS	$\pm 45^\circ$	254 g/m ²
Gelege CFK/IMS/272	Kohlenstofffaser Tenax IMS	$\pm 45^\circ$	272 g/m ²
Gelege EGlas/811	Glasfaser E-Glas	$\pm 45^\circ$	811 g/m ²

Die Schadensflächen nach Impact aller CAI Probekörper wurden gegenübergestellt und miteinander verglichen. Während des Impactvorganges wurde mittels einer Kraftmessdose am Impactorkopf die Kraft über der Zeit aufgezeichnet. Aus den Kraft-Zeit Verläufen wurde die Geschwindigkeit des Impactors aufgetragen über der Zeit berechnet. Aus der Differenz der Aufprall- und Austrittsgeschwindigkeit des Impactors kann die vom jeweiligen Probekörper absorbierte Energie bei Impact ermittelt werden. Reibungseinflüsse während des Impactvorganges wurden vernachlässigt.

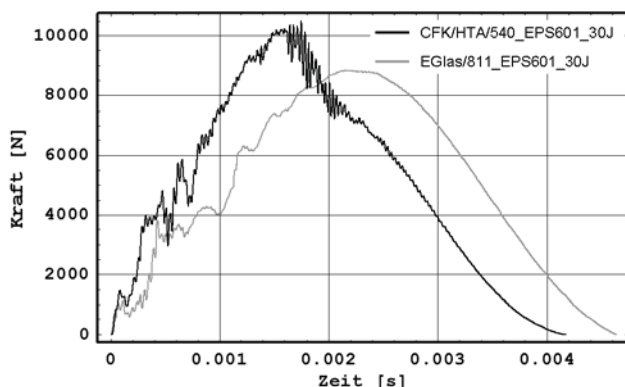


BILD 1. Kraft-Zeit Verläufe aufgenommen während eines Impacts von 30J. Schwarze Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTA/540_EPS601. Graue Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material Eglas/811_EPS601 [5].

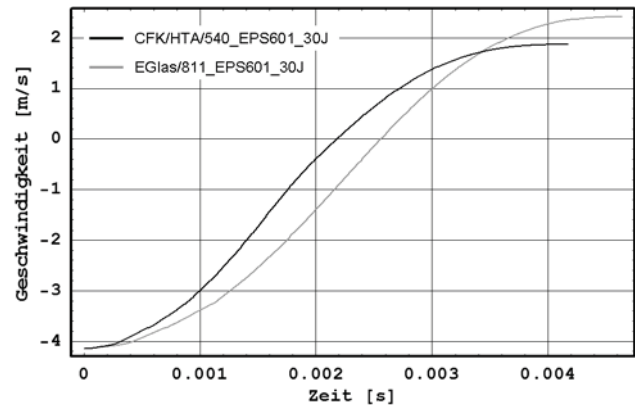
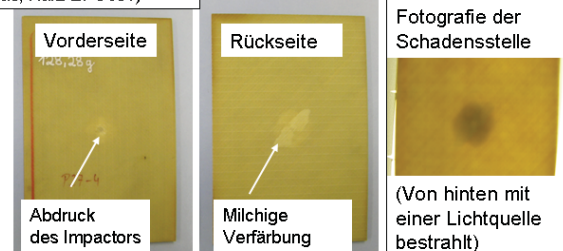


BILD 2. Geschwindigkeits-Zeit Verläufe abgeleitet aus den Kraft-Zeit Kurven in BILD 1. Schwarze Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTA/540_EPS601. Graue Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material Eglas/811_EPS601.

Um das Impactverhalten von Glasfasern mit dem von Kohlenstofffasern zu vergleichen, wurden CAI Platten aus den Faserhalbzeugen E-Glas/811 und CFK/HTA/540 gefertigt. Von beiden Halbzeugen sind 8 Lagen notwendig, um bei quasi-isotropem Aufbau eine wie nach DIN EN 6038 geforderte Dicke von etwa 4 mm zu erhalten. Als Harz wurde EPS601 verwendet. Die Herstellung der Platten erfolgte im Autoklaven mittels dem LRI Prozess. BILD 1 vergleicht am Beispiel eines 30J Impacts das Kraft-Zeit Verhalten einer Glasfaserprobe mit dem einer Probe aus Kohlenstofffasern. BILD 2 zeigt das aus BILD 1 abgeleitete Geschwindigkeits-Zeit Verhalten. BILD 3 stellt die Schadensfläche von einer Probe aus Glasfasern mit der einer Probe aus Kohlenstofffasern nach einem Impact von 16 J gegenüber.

CAI Platte nach 16 J Impact
(E-Glas, Harz EPS601)



CAI Platte nach 16 J Impact
(Kohlenstofffasern HTA, Harz EPS601)

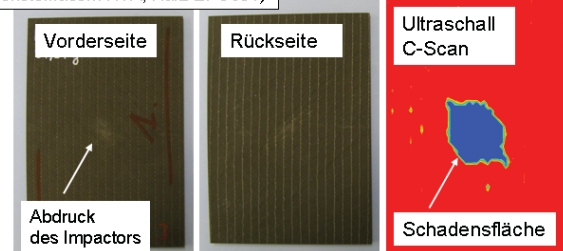


BILD 3. CAI Probekörper aus Kohlenstofffasern (CFK/HTA/540) und Glasfasern (EGlas/811) nach einem Impact von 16 J im Vergleich

BILD 4 vergleicht das Kraft-Zeit Verhalten während Impact von einer Probe aus HTS Kohlenstofffasern mit dem eines CAI Prüfkörpers aus HTA Kohlenstofffasern am Beispiel eines 16J Impacts. Die daraus abgeleiteten Geschwindigkeits-Zeit Verläufe sind in BILD 5 dargestellt. Die Probe aus HTS Fasern wurde aus dem Material CFK/HTS/540 mit RTM6 im Autoklaven gefertigt. Ihr Gegenspieler aus HTA Fasern besteht aus dem Faserhalbzeug CFK/HTA/540 und wurde ebenfalls mit RTM6 im Autoklaven imprägniert. Von beiden Materialien wurden 8 Lagen verwendet um bei quasi-isotropem Aufbau eine Dicke von etwa 4 mm zu erhalten.

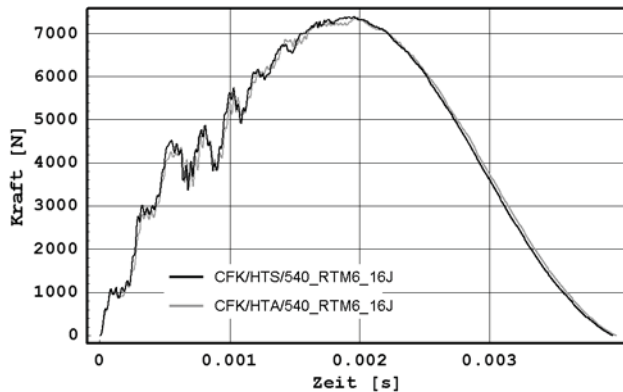


BILD 4. Kraft-Zeit Verläufe aufgenommen während eines Impacts von 16J. Schwarze Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTS/540_RT6. Graue Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTA/540_RT6.

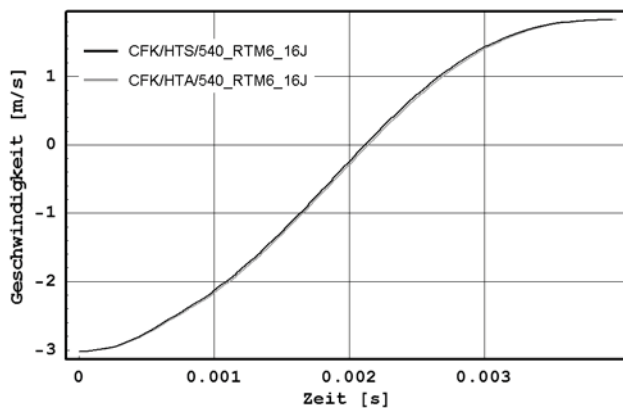


BILD 5. Geschwindigkeits-Zeit Verläufe abgeleitet aus den Kraft-Zeit Kurven in BILD 4. Schwarze Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTS/540_RT6. Graue Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTA/540_RT6.

Ein Vergleich des Kraft-Zeit Verhaltens während des Impactvorganges von IMS Fasern und HTS Fasern ist exemplarisch am Beispiel eines 40J Impacts in BILD 6 dargestellt. Die aus BILD 6 abgeleiteten Geschwindigkeits-Zeit Verläufe sind in BILD 7 abgebildet. Die Probe aus IMS Fasern wurde aus dem Faserhalbzeug CFK/IMS/272 in Kombination mit RTM6 gefertigt. Der Probekörper aus HTS Fasern besteht aus dem Fasermaterial CFK/HTS/254 und wurde ebenfalls mit RTM6 im Autoklaven imprägniert. Von beiden Materialien wurden 16 Lagen verwendet, um

eine Laminatdicke von ca. 4mm zu erhalten.

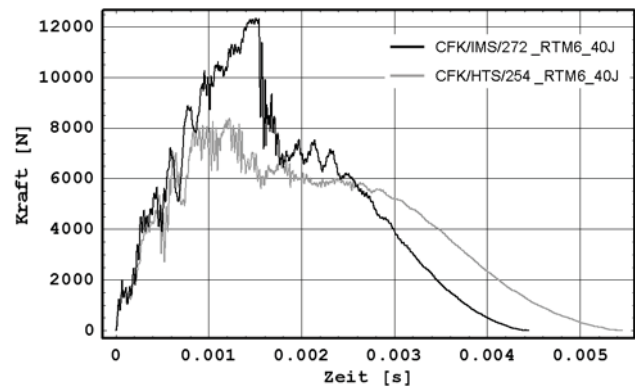


BILD 6. Kraft-Zeit Verläufe aufgenommen während eines Impacts von 40J. Schwarze Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/IMS/272_RT6. Graue Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTS/254_RT6 [5].

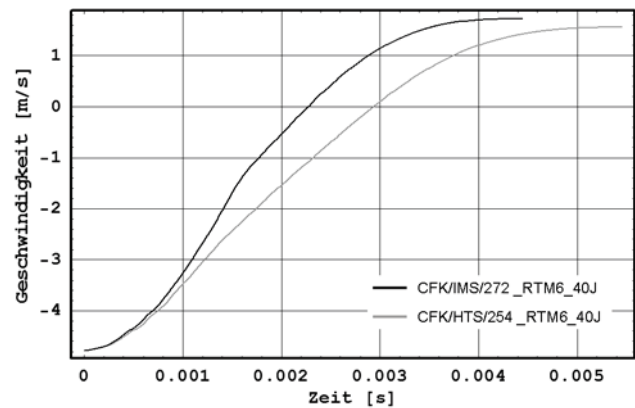


BILD 7. Geschwindigkeits-Zeit Verläufe abgeleitet aus den Kraft-Zeit Kurven in BILD 6. Schwarze Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/IMS/272_RT6. Graue Kurve: Impact auf eine CAI Probe bestehend aus dem Material CFK/HTS/254_RT6.

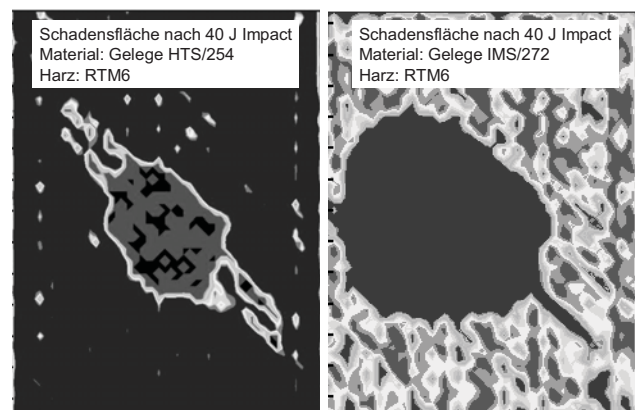


BILD 8. Vergleich der Schadensfläche nach einem 40J Impact an einer Probe bestehend aus HTS Fasern mit einer Probe bestehend aus IMS Fasern [5]

BILD 8 stellt die Schadensflächen nach einem 40 J Impact an einer Probe aus HTS Kohlenstofffasern und einer Probe aus IMS Kohlenstofffasern gegenüber.

Auf Basis der vorliegenden Kraft-Zeit bzw. Geschwindigkeits-Zeit Verläufe in Kombination mit den Schadensflächen nach Impact aus BILD 1 bis BILD 8 werden folgende Feststellungen getroffen:

- Die Probe aus Kohlenstofffasern zeigt bei einer Impactenergie von 30 J eine höhere maximale Kontaktkraft als die Probe aus Glasfasern. Die höhere Kontaktkraft ist nach [6] auf die höhere Steifigkeit der Kohlenstofffaser zurückzuführen.
- Die Austrittsgeschwindigkeit des Impactors ist bei der Probe aus Glasfasern (30J Impact) höher als beim Prüfkörper aus Kohlenstofffasern. Demnach absorbiert die Probe aus Glasfasern weniger Energie.
- Die CAI Probe aus Glasfasern zeigt eine kleinere Schadensfläche als der Probekörper aus Kohlenstofffasern.
- Das Kraft-Zeit Verhalten als auch das Geschwindigkeits-Zeit Verhalten der Proben aus HTS und HTA Fasern zeigen keine signifikanten Unterschiede.
- Die Probe aus IMS Fasern zeigt bei einer Impactenergie von 40J eine höhere maximale Kontaktkraft als die Probe aus HTS Fasern.
- Die Austrittsgeschwindigkeit des Impactors bei der Probe aus IMS Fasern ist ähnlich der der Probe aus HTS Fasern. Demnach absorbierten beide Probekörper Energie in ähnlichem Maße. Gleichzeitig ist die Schadensfläche nach Impact bei der Probe aus IMS Fasern größer als bei der Probe aus HTS Fasern. Unter Annahme ähnlicher Faser-Matrix Haftungen wird abgeleitet, dass bei dem CAI Prüfkörper aus IMS Fasern mehr Energie in Form von Delaminationen abgebaut wurde als bei der Probe aus HTS Fasern. Bei der Probe aus HTS Fasern muss demnach im Umkehrschluss mehr Energie in Form von Faserbrüchen abgebaut worden sein. Ähnliche Beobachtungen beschreibt [7].

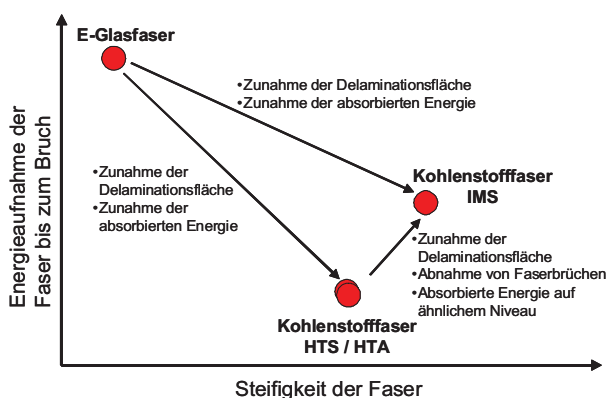


BILD 9. Experimentelle Analyse des Impactverhaltens in Zusammenhang mit der Energieaufnahme und Steifigkeit des Faserwerkstoffes.

BILD 9 setzt die auf experimenteller Basis gewonnenen Erkenntnisse in Zusammenhang mit der Energieaufnahme und der Steifigkeit des jeweiligen Faserwerkstoffes.

Um Schlussfolgerungen aus den vorliegenden experimentellen Daten zu ziehen, sollen zunächst noch einmal detailliert die bei einem „low-velocity“ Impact auftretenden Schadensarten erläutert werden. Nach [8] sind bei einem „low-velocity“ Impact vier verschiedene Schadensarten zu beobachten:

- 1) Schaden durch Kontakt des Impactors mit der Oberfläche des Faserverbundwerkstoffes.
- 2) Interne Delaminationen aufgrund von transversalen Schubspannungen (diese sind in der Mittelebene des Laminates maximal).
- 3) Matrix- und Faserbrüche im Druckbereich der Biegedehnung an der Oberseite der durch den Impact betroffenen Struktur
- 4) Matrixbrüche im Zugbereich der Biegedehnung an der Unterseite der Faserverbundstruktur. Diese Matrixbrüche begünstigen die Entstehung von Delaminationen an der Unterseite der Struktur (siehe Punkt 5) in BILD 10.)

BILD 10 veranschaulicht diese Schadensarten.

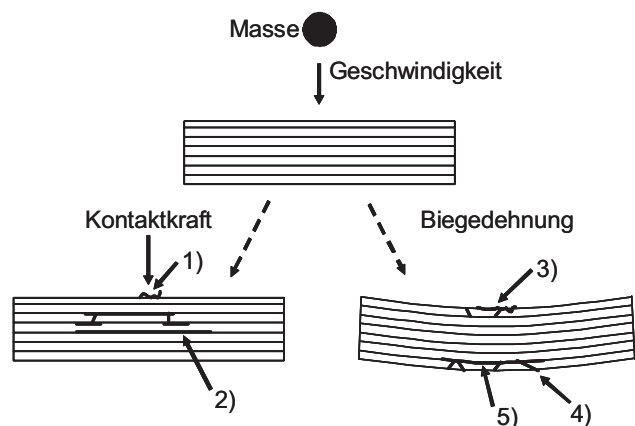


BILD 10. Schadensarten bei einem „low-velocity“ Impact [8]

In [8] wurden kleine (125 mm x 75 mm) und große (200 mm x 200 mm) Laminates mit gleicher Dicke durch einen Impact geschädigt. Es konnte gezeigt werden, dass die kleinen Versuchskörper höhere Kontaktkräfte bei Impact zeigten als die großen Platten. Die delaminierte Fläche innerhalb der kleinen Platte war größer als die der großen Platte. Als Erklärung hierfür wird in [8] das steifere Verhalten der kleinen Probe angeführt. Dies resultiert in einer höheren Kontaktkraft, welche wiederum zu großen Delaminationen aufgrund hoher transversalen Schubspannungen führt (siehe Punkt 2) in BILD 10). Strukturen mit niedriger Steifigkeit entwickeln niedrigere Kontaktkräfte und dementsprechend weniger interne Delaminationen. Die Dehnungen aufgrund Biegung sind bei weniger steifen Strukturen jedoch hoch. Dies führt nach [8] zu Delaminationen an der Unterseite der Struktur (siehe Punkt 4) und 5) in BILD 10).

Auf Basis der in BILD 9 dargestellten experimentellen Ergebnisse und den Beobachtungen aus [8] werden folgenden Schlussfolgerungen getroffen:

- In [8] wurde gezeigt, dass steife Strukturen hohe Kontaktkräfte bei Impact und eine große interne Delaminationsfläche hervorrufen. Diese Angabe

korreliert mit den vorliegenden Ergebnissen. Ein Vergleich von HTS mit IMS Fasern hat gezeigt, dass eine Probeplatte aus IMS Fasern eine höhere maximale Kontaktkraft aufweist. Ähnliche Beobachtungen wurden bei einem Vergleich von Glas mit Kohlenstofffasern bei einer Impactenergie von 30J gemacht. Dies lässt den Schluss zu, dass die Steifigkeit der Verstärkungsfaser das Impactverhalten einer Struktur maßgeblich beeinflusst. Es wird angenommen, dass eine hohe Steifigkeit der Verstärkungsfaser zu hohen Kontaktkräften bei Impact führt. Nach [8] resultieren diese in hohen transversalen Schubspannungen welche wiederum große interne Delaminationen hervorrufen. Große interne Delaminationen wurden bei dem Vergleich von HTS mit IMS Fasern beobachtet. Eine niedrige Steifigkeit der Verstärkungsfaser führt nach [8] zu hohen Zugdehnungen aufgrund Biegung an der Impact abgewandten Seite der Struktur. Diese begünstigen die Entstehung von Delaminationen an der Unterseite bzw. das „Abplatzen“ der letzten Lage im Laminat. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wird angenommen, dass bei den vorliegenden Werkstoffen und Impactenergien der Effekt der hohen Kontaktkraft auf die Entstehung von Delaminationen überwiegt.

- Das Energieaufnahmevermögen der Verstärkungsfaser beeinflusst die Entstehung von Faserbrüchen während des Impactvorganges. Ein hohes Energieaufnahmevermögen der Verstärkungsfasern führt dazu, dass Fasern während des Impactvorganges viel Energie elastisch speichern und wenig Energie in Form von Faserbrüchen abgebaut wird. Ähnlich wird dies in [1] beschrieben.

BILD 11 veranschaulicht diese Annahmen unter Vernachlässigung weiterer signifikanter Einflussparameter (wie beispielsweise Laminatdicke, Faserarchitektur, Faser-Matrix Haftung und Harzsystem) plakativ. Das Schaubild wurde auf Basis vorliegender experimenteller Ergebnisse entwickelt und sollte mittels weiterer Impactversuche mit anderen Materialien wie beispielsweise Aramid verifiziert werden. Hochzähes Aramid besitzt einen E-Modul (Zug) von 80 000 N/mm² bei einer Zugfestigkeit von 3 600 N/mm² [1]. Unter der Annahme eines linear elastischen Verhaltens der Faser bis zum Bruch ergibt sich eine Bruchdehnung von ca. 4,5 % und ein spezifisches Energieaufnahmevermögen von 8100 N/mm² (0,5 x Zugfestigkeit x Bruchdehnung). Ordnet man Aramid gedanklich in BILD 11 ein, so sollten Proben aus diesem Werkstoff nach Impact aufgrund des hohen Energieaufnahmevermögens wenige Faserbrüche aufweisen. Die Steifigkeit der Aramidfaser liegt mit 80 000 N/mm² ihm weitläufigen Bereich der Steifigkeit von E-Glasfasern. Es wären somit kleine interne Delaminationsflächen nach Impact zu erwarten.

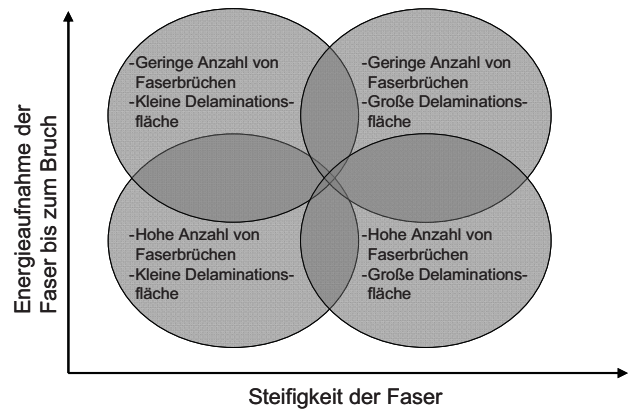


BILD 11. Einfluss von Energieaufnahme und Steifigkeit der Faser auf das Impactverhalten eines Faserverbundwerkstoffes („low-velocity“ Impact).

3. VERBESSERUNG DES IMPACTVERHALTENS MIT HILFE DER NÄHTECHNIK

Impacts auf Faserverbundstrukturen können weitläufige Schadensflächen verursachen. Durch die Separation der Lagen in einem Laminat entstehen Delaminationen. Um diese zu reduzieren, kann der trockene Preform vor der Imprägnierung mittels Nähetechniken verstärkt werden. Die so entstandene Verstärkung in Dickenrichtung des Laminates wirkt einer Separation der Lagen bei Impact entgegen. Am Beispiel von zwei Torsionswellen soll das Potential der Nähetechnik exemplarisch dargestellt werden. Für die Herstellung der textilen Preforms wurde das Flechtverfahren gewählt. Die Kerne mit einem Innendurchmesser von 45 mm wurden mit Kohlenstofffasern mit einer Orientierung von $\pm 45^\circ$ und 0° umflochten. Einer der beiden Preforms wurde zusätzlich mittels Tufting mit einem Aramidgarn in Dickenrichtung verstärkt. Die Stichlänge beträgt 4 mm. Der Abstand der Nähte um den Umfang verteilt beträgt in etwa 9 mm. Beide Preforms wurden mittels Vakuuminfiltration mit gleichem Harzsystem imprägniert. Die Wandstärke beider Wellen nach Infiltration beträgt ca. 1,8 mm. Die Wellen wurden anschließend unter identischen Bedingungen mit einem Impact von 30 J versehen. BILD 12 zeigt die mittels Lockin Thermographie bei gleicher Lockin-Frequenz analysierten Schadensflächen nach Impact. Auf der linken Seite ist die Schadensfläche nach Impact an der geflochtenen Welle dargestellt. Das Schadensmuster der geflochtenen und zusätzlich getufteten Welle ist auf der rechten Seite abgebildet. Die getuftete Flechtwelle zeigt das kleinere Schadensausmaß. Zur Ermittlung der Restfestigkeit nach Impact wurden beiden Wellen auf einem Torsionsprüfstand bis zum Bruch belastet. Die Kraft-Weg Kurven der Torsionsversuche sind in BILD 13 dargestellt. Die Steigungen der Kurven lassen darauf schließen, dass beide Wellen annähernd die gleiche Torsionssteifigkeit aufweisen. Die geflochtene Welle liegt mit einem Bruchmoment von ca. 250 Nm deutlich unter dem der zusätzlich getufteten Welle.

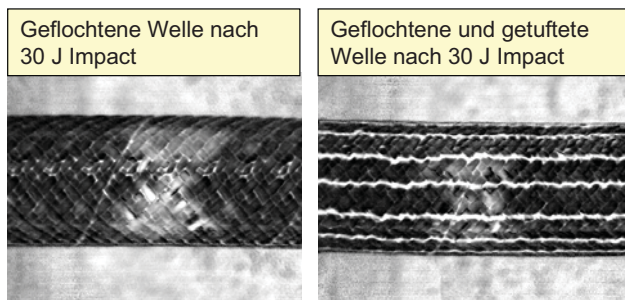


BILD 12. Schadensfläche nach einem Impact von 30J (analysiert mittels Lockin Thermographie)
Links: Geflochtene Welle.
Rechts: Geflochtene und getuftete Welle.

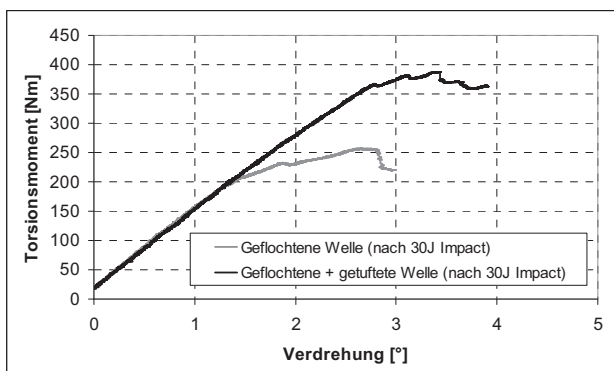


BILD 13. Torsionsbruchmoment nach 30 J Impact.
Graue Kurve: Geflochtene Welle
Schwarze Kurve: Geflochtene + getuftete Welle

DANKSAGUNG

Die in Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines Studentenseminars im Wintersemester 2007/2008 am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart ermittelt. Allen Beteiligten sei hiermit gedankt.

- [1] S. Abrate, Impact on laminated composite materials, American Society of Mechanical Engineers, Appl Mech Rev, vol. 44, no 4, 1991, pp. 155-190
- [2] H. Wagner, H. Bansemir, K. Drechsler, C. Weimer, Impact Behavior and Residual Strength of Carbon Fiber Textile based Materials, Proceedings SETEC 02/-07, SAMPE Europe, New Solutions for new Requirements, M. Erath, 2007, pp. 15-25
- [3] G. W. Ehrenstein, Faserverbundkunststoffe, Hanser Verlag, 2006
- [4] <http://www.tohotenax-eu.com>
- [5] H. Wagner, H. Bansemir, K. Drechsler, Verhalten unterschiedlicher FVW-Bauweisen und Fertigungstechniken unter Schlagbelastung, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Darmstadt, 2008
- [6] G.A. Bibo, P.J. Hogg, The role of reinforcement architecture on impact damage mechanisms and post-impact compression behaviour, Journal of Materials Science, vol. 31, 1996, pp. 1115-1137
- [7] D.D.R. Cartié, P.E. Irving, Effect of resin and fiber

properties on impact and compression after impact performance of CFRP, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 33, no 4, 2002, pp. 483-493

- [8] X. Zhang, Impact damage in composite aircraft structures – experimental testing and numerical simulation, Proc Instn Mech Engrs, vol 212, Part G, 1998, pp. 245-259