

EFFIZIENZSTEIGERUNG VON HOCHLEISTUNGSFASERVERBUNDSTRUKTUREN DURCH LOKALE CFK/METALL VERSTÄRKUNG

A. Fink, B. Kolesnikov, L. Herbeck
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, DLR
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

1. ÜBERSICHT

Bolzen- und Nietverbindungen sind nach wie vor als Verbindungstechnik von Faserverbundstrukturen weit verbreitet. Die Nutzung des Werkstoffpotentials von Faserverbundmaterialien wird hierbei jedoch durch die Verbindungseffizienz der Strukturkopplung stark beeinflusst. Während bei metallischen Werkstoffen die statische Festigkeit einer Bolzenverbindung mit steigender Materialfestigkeit zunimmt, wird diese bei Faserverbundwerkstoffen durch deren Kerbempfindlichkeit sowie niedrige Lochleibungs- und Scherfestigkeit stark beeinträchtigt. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR in Braunschweig beschäftigt sich mit der Entwicklung von lokal eingesetzten Metallhybriden, mit dem Ziel einer deutlichen Erhöhung des Anschlussgütegrades und Leichtbaupotentials von Bolzenverbindungen bei einem vertretbaren Fertigungsaufwand. Diese Werkstoffe weisen eine lokale Einbettung von Metalllamellen im Kopplungsbereich des Faserverbundlaminats auf, wobei Titanlegierungen und Stahl als Verstärkungsmaterialien zur Anwendung kommen.

2. EINLEITUNG

Zunehmende Anforderungen nach immer leichteren und effizienteren Strukturen erfordern den Einsatz von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen für Luft- und Raumfahrtanwendungen, jedoch auch zunehmend für Erzeugnisse in den Bereichen Verkehr und Maschinenbau. Durch den Einsatz von Faserverbundmaterialien können nicht nur erhebliche Gewichtsvorteile gegenüber konventionellen Metallstrukturen, sondern ebenso deutliche Kostenreduktionen durch flexible und wirtschaftliche Fertigungsverfahren erzielt, sowie Ermüdungs- und Korrosionsprobleme ausgeschaltet werden.

Trotz des hohen realisierbaren Integrationsgrades von Faserverbundbauweisen, bleibt die Strukturkopplung eine wesentliche und unausweichliche Aufgabe und Herausforderung an den Strukturentwickler: Montage-, Inspektions-, Reparatur- und Transportrestriktionen erfordern die Entwicklung differentieller Bauweisen und der damit einhergehenden Verbindungstechniken.

Bolzen- und Nietverbindungen sind nach wie vor als Verbindungstechnik von Faserverbundbauweisen weit verbreitet, trotz der faserngerechten Philosophie dieser Verbindungstechnik. Die Nutzung des Werkstoffpotentials von Faserver-

bundwerkstoffen, insbesondere bei einem hohen Anisotropiegrad, wird durch die Kopplungseffizienz der Verbindungstechnik stark beeinflusst. Während bei metallischen Werkstoffen die statische Festigkeit, und damit auch die Lochleibungsfestigkeit, mit steigender Materialfestigkeit zunehmen, werden diese bei Faserverbundwerkstoffen durch deren Kerbempfindlichkeit sowie niedrige Lochleibungs- und Scherfestigkeiten stark beeinträchtigt. Die Gestaltung einer tragfähigen Verbindung gestaltet sich auch aufgrund der starken Laminat-, Geometrie und Klimaabhängigkeit als schwierig.

Die Tragfähigkeit von Bolzenverbindungen wird üblicherweise mittels einer lokalen Laminataufdickung erhöht. Die hierfür notwendige zusätzliche Laminatdicke führt jedoch zu Sekundärbelastungen infolge von exzentrischer Lasteinleitung, insbesondere bei einseitig aufgetragenen Aufdickungen, sowie zu einer erhöhten Komplexität der Bauteilgeometrie und derer benachbarter Anschlussbauteile. Laminataufdickungen erfordern größere Verbindungselemente und metallische Beschläge, die zu einem erhöhten Gewicht der Verbindung führen.

Das geringe Leichtbaupotential herkömmlicher mechanischer Fügeverfahren und deren Verstärkungstechniken erfordert daher die Entwicklung fortschrittlicher Technologien, die es erlauben, die herausragenden Eigenschaften von Hochleistungsfaserverbundstrukturen bei realen Strukturen optimal auszuschöpfen.

3. VERSTÄRKUNGSKONZEPT

Eine konstruktive Maßnahme zur Erhöhung der Kopplungseffizienz von Faserverbundbauweisen sieht eine lokale Einbettung von dünnen Metallblechen oder -folien im Laminat des Anschlussbereiches mittels eines Schichtersatzes vor (BILD 1, BILD 2).

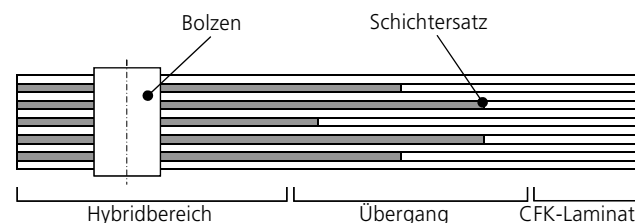


BILD 1. Lokale Verstärkung von mechanischen Fügungen mittels eingebetteter Metallfolien

Laminatschichten, die am wenigsten zur Lastaufnahme im

Laminat beitragen, werden vorzugsweise durch entsprechende Metallschichten ersetzt; die restlichen Laminatschichten werden ununterbrochen durch den Übergangsbereich in den verstärkten Bereich fortgeführt.

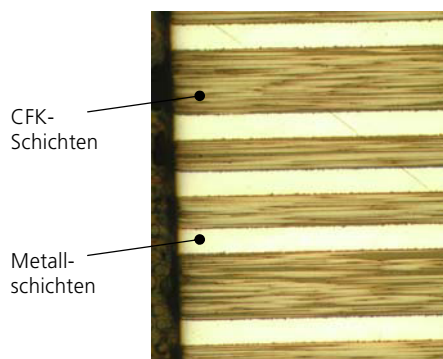


BILD 2. Lokale Einbettung von Metallschichten im Bolzenverbindungs-bereich

Auf diese Weise entsteht ein Gradientenwerkstoff mit verbesserten Lochleibungs- und Schereigenschaften bei hohen Zug- und Druckfestigkeiten im Anschlussbereich. Laminataufdickungen können vermieden werden, wodurch die Lasten in der Ebene zentrisch weitergeleitet, die Klemmlängen und die Größe der Verbindungselemente reduziert und die Bauteilgestalt vereinfacht werden.

Der Einsatz von dünnen Metallfolien erlaubt eine feine Diskretisierung und Abstufung des Überganges vom reinen CFK-Laminat zum CFK-Metall Hybrid (BILD 3). Der Schichtersatz erzeugt Lastumleitungen durch die Schichttrennung (*ply-drop-off*) mit den damit verbundenen interlaminaren Schubbeanspruchungen, sowie eine neue Lastverteilung in der eine progressive Entlastung der ununterbrochenen CFK-Schichten erfolgt. Die Querschnittsschwächung und die Spannungskonzentrationen können durch den Einsatz dünner Metallfolien minimiert werden. Die minimale Folienstärke ist hierbei einerseits durch die mit abnehmender Foliendicke zunehmenden Material- und Fertigungskosten, sowie durch die Schichtdicke der ersetzbaren CFK-Schichten limitiert. Der Einsatz dickerer Metallbleche reduziert zwar die Anzahl der zu prozessierenden und abzulegenden Metallschichten, vermindert aber andererseits die Anpassbarkeit der Bleche ohne eine Vorverformung an die Bauteilkrümmung und beeinträchtigt die Festigkeit des Übergangsbereiches durch erhöhte Spannungskonzentrationen, Lastumleitungen und Querschnittsschwächungen.

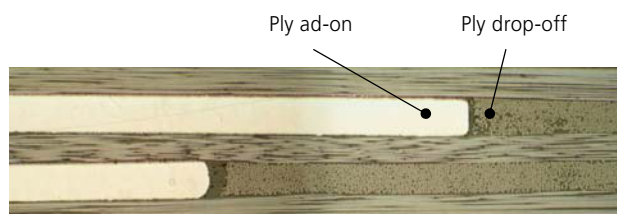


BILD 3. Schichtersatz im Übergangsbereich

4. VERSTÄRKUNGSMATERIAL

Als Verstärkungsmaterial sind $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen (Ti-6Al-4V), höherfeste β -Titanlegierungen (Ti 15-3-3-3) und hochfeste, korrosionsbeständige austenitische Stähle (1.4310) eingesetzt worden. Titanlegierungen zeichnen sich aus durch ihre hohen spezifischen mechanischen Eigenschaften, ihre sehr guten Korrosionseigenschaften und elektrochemischen Kompatibilität zu Kohlenstoff, sowie durch ihren verhältnismäßig geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu CFK. Die geringen Werkstoffkosten und die höheren absoluten Festigkeiten von hochfesten Stählen charakterisieren das Einsatzpotential dieses Verstärkungsmaterials: höhere Lochleibungsfestigkeiten reduzieren den erforderlichen Metallgehalt und somit die mit der Metallschichtanzahl zusammenhängenden Prozess- und Fertigungskosten, und erhöhen die Festigkeit des Übergangsbereiches. Eine höhere Dichte, größere Wärmeausdehnungskoeffizienten und eine mögliche galvanische Inkompatibilität sind jedoch wesentliche, zu beachtende Nachteile.

Verstärkungswerkstoff	Ti 6Al-4V	Ti 15-3-3-3	1.4310
Zugfestigkeit [Mpa]	950 ²	1226 ⁵	1640 ⁵
Lochleibungsfestigkeit [Mpa]	1875 ⁴	2084 ¹	2880 ¹
E-modul [Gpa]	110 ²	100 ⁵	190 ⁵
Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /°C]	8,6 ³	8,6 ³	16,4 ³

¹ Theoretische Werte nach HSB 20110-01

² Herstellerangabe

³ Bei 20°C

⁴ Nach HSB 12571-01

⁵ Getestet

TAB 1. Eigenschaften der untersuchten Verstärkungswerkstoffe

5. TECHNOLOGIE

Die Prepregtechnologie ist die meist eingesetzte Fertigungstechnologie für Faserverbundbauteile für Luft- und Raumfahrtanwendungen. Aufgrund des diskreten Schichtaufbaus bietet die Prepregtechnologie eine große Flexibilität für die Konzeption der Hybridverstärkung und die Gestaltung des Übergangsbereiches. Der Schichtersatz kann optimal in Abhängigkeit der Schichtkonfiguration des Grundlaminates konzipiert werden.

Der Einsatz eines Schichtersatzes bei nasstechnologisch hergestellten Bauteilen ist angesichts der in dieser Technologie verwendeten Multiaxialgelegen nur eingeschränkt möglich: die Zusammenführung einzelner Schichten als Halbzeuge erlaubt nur bei dicken Laminaten mit einer minimalen Schichtanzahl einen Schichtersatz. Die Anzahl der durch Schichtersatz einbettbaren Metallschichten ist eingeschränkt. Bei dünnen Laminaten mit einer geringen Schichtanzahl ist eine Verstärkung nur über einen Schichtzusatz möglich, doch auch hier ergeben sich Vorteile gegenüber konventionellen monolithischen Aufdickungen. Vorgefertigte Hybridpreforms können hierbei als Doppler oder als Einsatz Verwendung finden. Die Durchtränkbarkeit eines lokal hybridisierten, hergestellten Bauteils stellt bei der Harzinjektionstechnologie kein Problem dar.

Eine starke und langzeitbeständige Haftung der Metallschichten an der angrenzenden polymeren Matrix der CFK-Schichten ist ausschlaggebend für die funktionale Integrität des Hybridwerkstoffs. Die Kopplungseffizienz des Über-

gangsbereiches, sowie das Ermüdungsverhalten und die Schadenstoleranz des Materials werden stark von der Adhäsionsgüte beeinflusst. Zwecks einer stabilen Haftungsqualität werden die metallischen Oberflächen einer mechanischen und einer anschließenden chemischen oder physikalischen Vorbehandlung unterzogen. Diese Obeflächenaktivierung gilt als eine wesentliche Maßnahme zur Gewährleistung einer zeitstabilen Funktionalität des Hybridwerkstoffes. Verschiedene Vorbehandlungsmaßnahmen sind eingesetzt und getestet worden: konventionelle nasschemische Verfahren (Beizprozesse), flammenpyrolytische Verfahren und SolGel-Verfahren.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zu CFK/Titan und CFK/Stahl Metallhybrid sind Metallblechdicken von 0,1 bis 0,3mm, sowie Prepregmaterial Ciba 6376C-HTA/HTS einer Dicke von 0,125 und 0,25mm bzw. UD-Gelege Torayca T700 5C für die nasstechnologisch hergestellten Probekörper eingesetzt worden.

6. ERGEBNISSE

6.1. Interlaminare Scherfestigkeit

Die interlaminare Scherfestigkeit (ILS) kann als Maß für die statische Qualität der Interface-Anbindung zwischen der vorbehandelten metallischen Oberfläche und dem Epoxidharz herangezogen werden.

Die hohen erreichbaren interlaminaren Scherfestigkeiten für sämtliche Konditionierungs- (Sättigung bei 50% bis 100% rel. Feuchte) und Prüfbedingungen (-55°C bis +120°C) ergeben ein für die eingesetzten Vorbehandlungsverfahren starkes Haftungsvermögen. Bei zunehmenden Temperaturen und Feuchtegehalten wird der Unterschied zu den ILS-Werten des CFK-Laminats geringer. Trotz der höheren residualen Thermalspannungen des Stahlhybrids sind keine wesentlichen Unterschiede zu den gemessenen Werten des Titanhybrids festzustellen.

Als Versagensmechanismus tritt eine Delamination am Metall/CFK-Interface, die durch einen optimalen kohäsiven Bruch gekennzeichnet ist (BILD 4). Im Bruchbild sind deutlich die Matrixschubbrüche, sowie Faserfilamente zu erkennen.

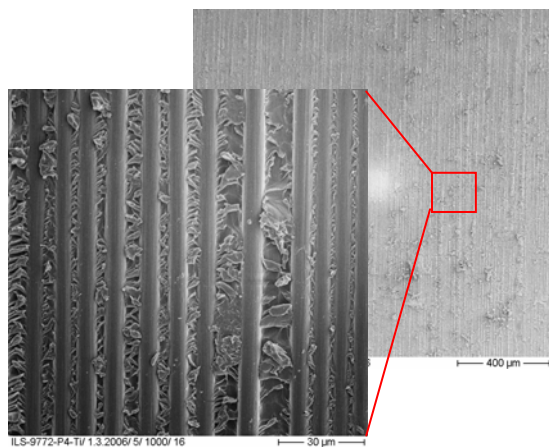


BILD 4. Interlaminarer kohäsiver Schubbruch

6.2. Lochleibungsfestigkeit

Das Ziel einer lokalen Hybridisierung des CFK-Bauteils ist die Erhöhung der Tragfähigkeit einer Bolzenverbindung durch Ausnutzung der isotropen Werkstoffeigenschaften eingebetteter Metallschichten. Eine wesentliche Erhöhung der Tragfähigkeit kann hierbei nur mit hochfesten Werkstoffen erzielt werden, die gleichzeitig eine hohe Steigerung der Lochleibungsfestigkeit, der Scherfestigkeit und der Zug- und Druckfestigkeit des Hybridmaterials bei realisierbaren Metallgehalten erlauben.

6.2.1. CFK/Ti

Die Lochleibungsfestigkeit von CFK/Ti-Hybridmaterial, bestehend aus 0°-CFK-Schichten und verschiedenen Titanvolumenanteilen, ist in BILD 5 dargestellt. Die Proben wurden unter 0°-on-axis und 90°-off-axis bei seitlicher Klemmung („bolt bearing test“) getestet. Die Proben weisen Randabstandsverhältnisse von $w/d=4$, bzw. $e/d=3$ auf. Die hierfür eingesetzte Titanlegierung ist die gängige, weit verbreitete Ti 6Al-4V¹.

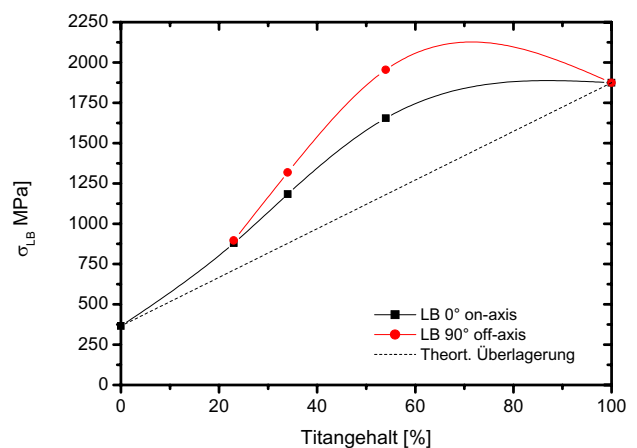


BILD 5. Lochleibungsfestigkeit von CFK/Ti in Abhängigkeit variierenden Titangehaltes

Es ist aus den dargestellten Verläufen ersichtlich, dass die Tragfähigkeit des CFK-Titanhybrids bei einer Bolzenbeanspruchung weit aus größer ist als die theoretische Superposition der Tragfähigkeiten beider Komponenten nach deren Mischungsverhältnis: die positive Interaktion beider Komponenten ist bei einem Titananteil von etwa 50% bei beiden Belastungsrichtungen am größten, und führt dazu, dass schon bei Titangehalten von 50% die Lochleibungsfestigkeit von reinem Titan erreicht wird.

Die getesteten Lochleibungsproben weisen ein Scherversagen bei niedrigen Titangehalten, bzw. ein Cleavage-Versagen bei höheren Titangehalten auf. Dies ist in dem untersuchten, geringen Randabstand w/d zu begründen, der nicht der Norm für Lochleibungstests entspricht. Die maximale Lochleibungskapazität ist somit bei den aufgeführten Untersuchungen nicht vollständig ausgeschöpft, und spiegelt somit nicht die maximale Tragfähigkeitserhöhung auf Lochleibung auf.

¹ Im folgenden beziehen sich die Ergebnisse, sofern nicht explizit anders erwähnt, auf die Titanlegierung Ti 6Al-4V

6.2.2. CFK/St

Die Lochleibungsfestigkeit (getestet nach AITM-1.0009, $w/d=7$, $e/d=4$) eines Stahlhybrids bestehend aus 0° CFK-Schichten und verschiedenen Stahlgehalten ist in BILD 6 im Vergleich zu den für die Titanhybride ermittelten Werten dargestellt. Schon bei niedrigen Stahlgehalten findet eine erhebliche Steigerung der Tragfähigkeit; eine optimale Interaktion der Komponenten – positive Abweichung von der theoretischen Tragfähigkeit nach den Mischungsverhältnissen – findet bei niedrigen Stahlgehalten von etwa 20% statt.

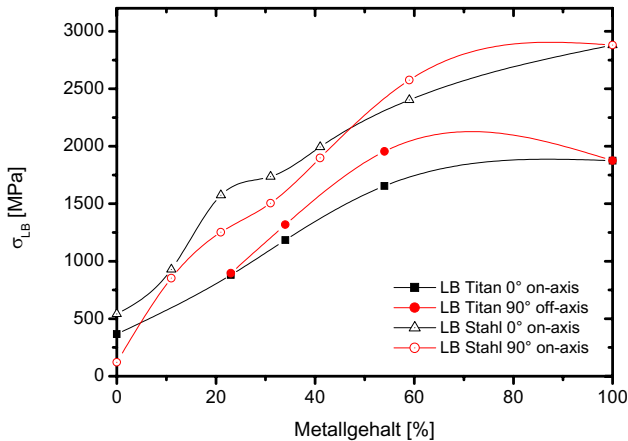


BILD 6. Lochleibungsfestigkeiten von CFK/St und CFK/Ti im Vergleich²

Die höheren Zugfestigkeiten des verwendeten Stahles rufen im gesamten Testbereich höhere absolute Lochleibungsfestigkeiten hervor, trotz der wesentlich höheren thermischen Residualspannungen des Stahlhybrids. Bei einem geringen Stahlgehalt von 20% ist eine ca. 100%ige Verbesserung der Lochleibungsfestigkeit gegenüber dem Titanhybrid bei einer 0° -on-axis Belastung erreichbar. Während die Entfaltung der maximalen Lochleibungskapazität des Titanhybrids schon bei einem Metallgehalt von etwa 50% erreicht wird, ist beim Stahlhybrid eine stetige Festigkeitszunahme mit steigendem Stahlgehalt zu verzeichnen.

Bei beiden Hybridmaterialien ist eine höhere Lochleibungsfestigkeit bei geringeren Metallgehalten unter 0° -on-axis Belastung zu erkennen, während bei höheren Metallgehalten eine 90° -off-axis Belastung deutliche Tragfähigkeitserhöhungen zu verzeichnen sind. Aufgrund der Tatsache, dass ein Schichtersatz bei der lokalen Hybridisierung prinzipiell angestrebt wird, und kontinuierliche, ununterbrochene CFK-Schichten vorgesehen werden – die gleichzeitig als verbindende Komponente zwischen den einzelnen metallischen Schichten agieren – kann im realen Fall ein maximales Metallgehalt von etwa 50% unter Verwendung gleichdicker Metall- und CFK-Schichten bzw. von etwa 77% unter Verwendung doppelt so starker Metallschichten erreicht wer-

² Die Lochleibungsfestigkeiten sind für CFK/Ti bei einem Randabstandsverhältnis von $w/d=4$, während sie bei CFK/St bei $w/d=7$ ermittelt worden sind. Trotz dieser Unterschiede in den Testbedingungen ist ein direkter Vergleich gemäß BILD 8 zulässig, da eine Reduktion des Randabstandes bei CFK/St auf $w/d=4$ bei Metallgehalten zwischen 20% und 50% nicht zu einer Abnahme der Lochleibungstragfähigkeit führt. Die Abweichenden Probengeometrien sind ebenso Ursache für die abweichenden Startwerte bei 0%igen Metallgehalt.

den. Letzter Fall ist jedoch durch eine deutliche Ineffizienz im Übergangsbereich gekennzeichnet.

Die Lochleibungsfestigkeit von CFK-St in Abhängigkeit des Stahlgehaltes und des Gehaltes an 90° -Lagen des kombinierten $0^\circ/90^\circ$ -CFK-Laminates ist in BILD 7 dargestellt. Bei geringeren Stahlgehalten führt ein Anteil an 90° -Lagen von etwa 30% zu einem Optimum, während bei Metallgehalten von etwa 45% kein wesentlicher Einfluss des $0^\circ/90^\circ$ Lagenverhältnisses zu erkennen ist. Bei höheren Stahlgehalten wirkt sich ein erhöhter 90° -Lagenanteil positiv aus.

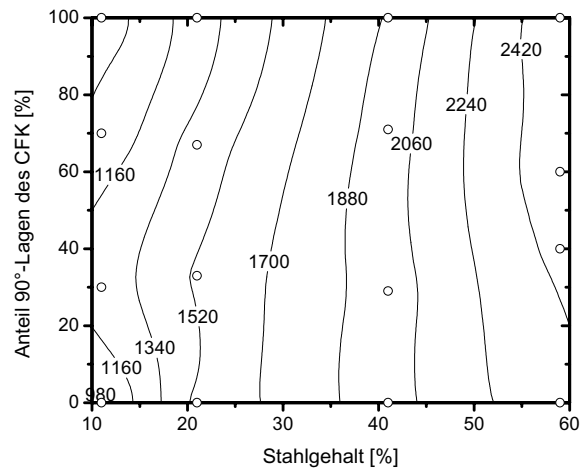


BILD 7. Lochleibungsfestigkeit von CFK/St in Abhängigkeit des $0^\circ/90^\circ$ -Lagenanteils der CFK-Komponente

Die Lochleibungsfestigkeit eines Stahlhybridmaterials mit einem Stahlgehalt von 31% in Abhängigkeit der Randabstände e/d und w/d ist in BILD 8 wiedergegeben. Es ist hieraus ersichtlich, dass die maximale Lochleibungstragfähigkeit – Versagen auf echter Lochleibung – schon bei relativ kleinen Randabständen von $e/d=w/d=3$ erreicht wird. Kleiner Randabstände w und e führen zum Wangenbruch bzw. zum Scherbruch.

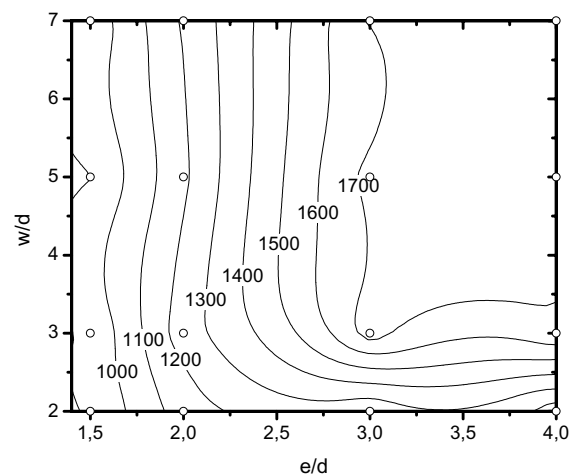


BILD 8. Lochleibungsfestigkeit von CFK/St [69/St31/0] in Abhängigkeit der Randabstände w/d und e/d ³

Der Vergleich zu zwei herkömmlichen CFK-Laminaten hoher

³ w : Probenbreite; d : Bolzendurchmesser; e : Randabstand der Bolzenbohrung in Belastungsrichtung

Lochleibungsfestigkeit ist in BILD 9 dargestellt. Die CFK-Laminat entfalten erst bei höheren Randabständen – w/d zwischen 4 und 6, [2] – ihre maximale Lochleibungskapazität. Dies ist an dem gegenläufigen Verhalten der Laminatfestigkeit im Nettoquerschnitt und der Lochleibungsfestigkeit der CFK-Werkstoffe zu begründen: niedrigere Festigkeiten erfordern höhere Breiten w, um einen Wangenbruch zu unterbinden. Hieraus lässt sich der metallische Einfluss des Hybrids erkennen, der gleichzeitig eine Zunahme der Lochleibungsfestigkeit und der Laminatfestigkeit herbeiführt. Dieses Verhalten lässt eine weitere Effizienzsteigerung der Kopplung und somit auch ein weiteres Gewichteinsparungspotential erkennen: kleinere Randabstände erlauben eine höhere Bolzenanzahl in einer Reihe bei maximaler Lochleibungskapazität.

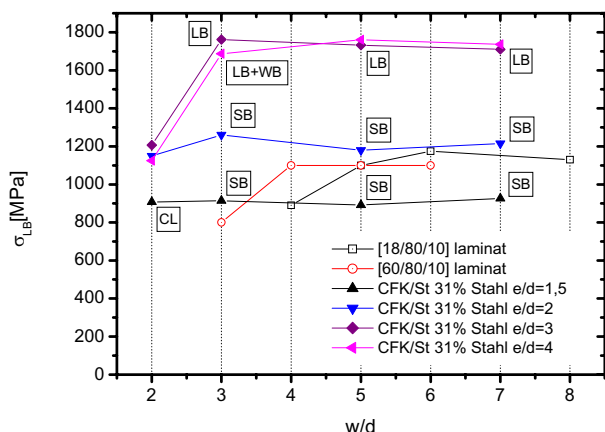


BILD 9. Lochleibungsfestigkeiten und Versagensarten vom CFK/St Hybridlaminat [69/St31/0] bei variierenden Randabständen im Vergleich zu konventionellen CFK-Laminaten⁴

Bei zunehmender Temperatur steigt zunächst die Lochleibungsfestigkeit infolge der abnehmenden thermischen Residualspannungen; bei höheren Temperaturen überwiegt die Degradation der CFK-Komponente und die Lochleibungsfestigkeit nimmt ab (BILD 10). Bezogen auf die Lochleibungskapazität bei RT ergibt sich jedoch ein geringerer Festigkeitsabfall im Vergleich zu CFK [3].

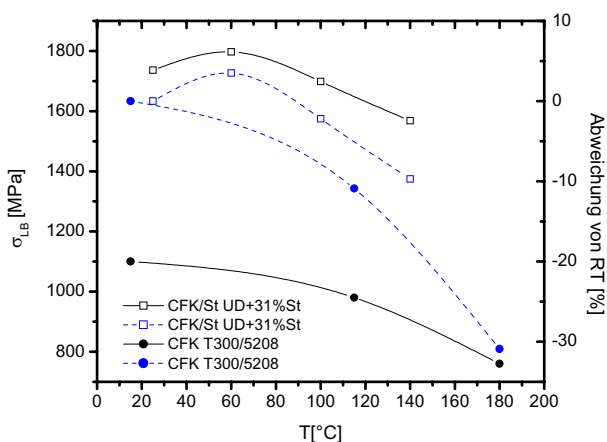


BILD 10. Temperaturabhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit

⁴ LB: Lochleibungsbruch; WB: Wangenbruch; CL: Cleavage Bruch; SB: Scherbruch

Ein Vergleich der absoluten Lochleibungsfestigkeiten von unverstärktem und verstärktem CFK/Laminat, sowie der Verstärkungswerkstoffe ist in BILD 11 dargestellt.

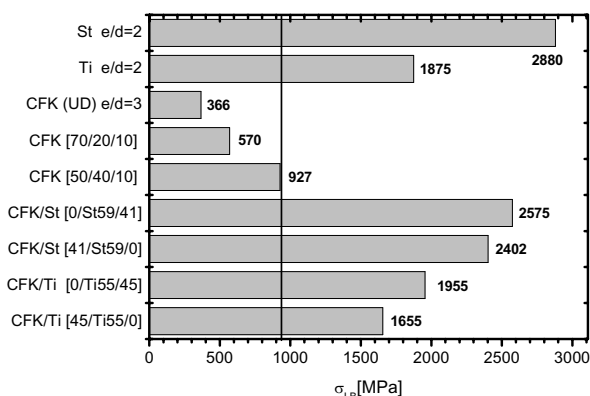


BILD 11. Lochleibungsfestigkeiten verschiedener verstärkten und unverstärkten Werkstoffe

Deutlich zu ersehen ist der Tragfähigkeitsgewinn von beiden Hybridmaterialien im Vergleich zu einem konventionellen Flugzeuglaminat [50/40/10] (Flügel laminat). Die Lochleibungsfestigkeit eines Titanhybrids bei einem Titangehalt von 55% beträgt zwischen 180% und 211% des reinen CFK-Laminats (on-axis bzw. of-axis Belastung). Dagegen beträgt die Festigkeit des Stahlhybrids bei ähnlichen Metallgehalten 259% bzw. 278% des CFK-Laminats.

6.3. Spezifische Lochleibungsfestigkeit

Die Verläufe der spezifischen Lochleibungsfestigkeiten beider CFK-Metallhybriden sind in BILD 12 dargestellt. Im Bereich kleinerer Metallgehalte zeichnet sich das CFK/Stahl-Hybrid durch deutlich bessere spezifische Lochleibungsfestigkeiten aus als die mit dem CFK/Ti-Hybrid erzielbaren Werte. Ab einem Metallgehalt von 40% bei 0°-on-axis Belastung bzw. von 25% bei 90°-off-axis-Belastung übertrifft die spezifische Lochleibungsfestigkeit des Titanhybrids.

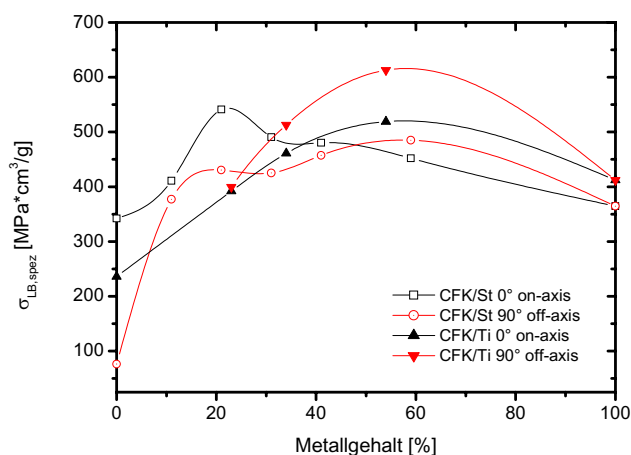


BILD 12. Spezifische Lochleibungsfestigkeit von CFK/Ti und CFK/St bei on- axis und off-axis Belastung im Vergleich

Ein Vergleich der spezifischen Lochleibungsfestigkeit unterschiedlicher unverstärkter und verstärkter Laminat, sowie Verstärkungswerkstoffe ist in BILD 13 dargestellt.

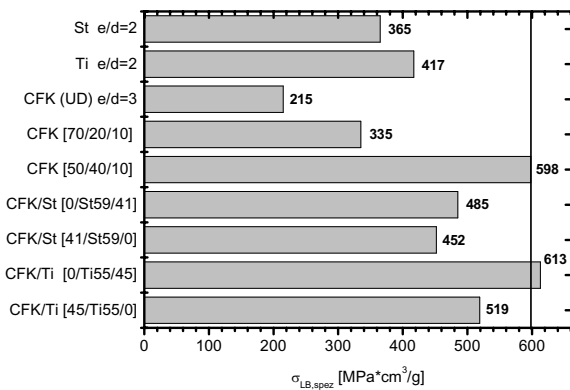


BILD 13. Spezifische Lochleibungsfestigkeiten verschiedener verstärkten und unverstärkten Werkstoffe

Es ist ersichtlich, dass besondere CFK-Lamine die höchsten spezifischen Lochleibungsfestigkeiten liefern. Die spezifischen Werkstoffkennwerte spiegeln im Allgemeinen das Leichtbaupotential eines Werkstoffes wieder; dennoch geben die spezifischen Eigenschaften der Hybridlamine nicht die Gewichtseffizienz der gesamten Verbindungstechnik wieder. Hohe absolute mechanische Eigenschaften des Kopplungsbereiches tragen, trotz der niedrigeren spezifischen Eigenschaften, zu einer erheblichen Gewichtsreduzierung der gesamten Bauweise der Verbindung bei, da auf diese Weise die Klemmlängen, die Anzahl und Größe der Verbindungselemente, die Überlappungslängen und die Ausmaße von Anschlusselementen und Beschläge deutlich reduziert werden können. Für die Gewichtseffizienz einer Verbindungstechnik sind somit nicht die spezifischen, sondern die absoluten Tragfähigkeiten von ausschlaggebender Bedeutung.

Gegenüber anderen Laminaten, beispielsweise [70/20/10], sind durch den Einsatz von Metalllaminaten jedoch auch bessere spezifische Eigenschaften erreichbar.

Ein gewichtsbezogener Vergleich beider Hybridmaterialien in Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit ist in BILD 14 zu sehen. Bei vorgegebener Lochleibungsfestigkeit sind keine Unterschiede in der Dichte der für die Einhaltung der vorgegebenen Festigkeit notwendigen Konfigurationen der beiden Hybridlamine zu verzeichnen.

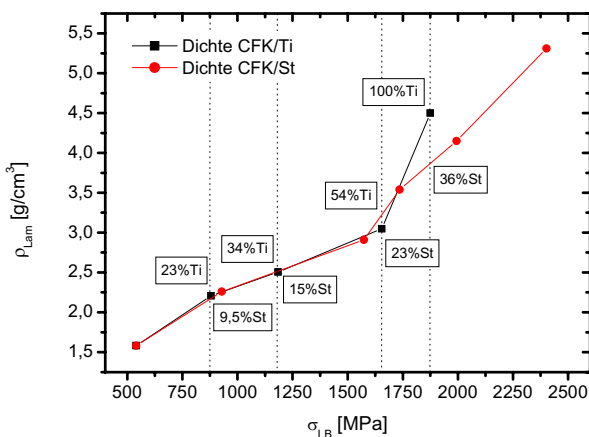


BILD 14. Laminatdichte und erforderlicher Metallgehalt in Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit für CFK/St und CFK/Ti

Der ausschlaggebende Unterschied ergibt sich aus dem hierfür einzustellenden Metallgehalt: der Titanhybrid erfordert für die gleiche Lochleibungsfestigkeit grundsätzlich mehr als doppelt so viel Metallgehalt als beim Stahlhybrid. Folglich sind die Anzahl der einzubettenden Metallschichten und die damit verbundenen Fertigungs- und Prozesskosten beim Stahlhybrid geringer als beim Titanhybrid. Eine geringe Anzahl der Metallschichten lässt zudem eine größere Flexibilität und Effizienz in der Gestaltung des Übergangsbereiches zu und erlaubt die Nutzung von ununterbrochenen, lochleibungsfestigkeitssteigernden CFK-Schichten des Grundlaminats.

6.4. Nasslamine

Die Lochleibungsfestigkeit von mittels Harzinjektion hergestellten Stahllaminaten in Vergleich zu den Prepreglaminaten ist in BILD 15 dargestellt. Eine maximale Abweichung von 10% bei 0°-on-axis Belastung, bzw. von etwa 8% bei 90°-off-axis Belastung sind zu verzeichnen. Bei steigendem Metallgehalt sind keine wesentlichen Unterschiede erkennbar.

Die Durchtränkbarkeit von Hybridlaminaten ist experimentell und durch Simulation untersucht worden. Lokale Hybridlamine lassen sich unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen fehlerfrei durchtränken. Die notwendige Durchtränkung in der Ebene – eine effektivere Durchtränkung in Dickenrichtung ist durch die eingebetteten Metallschichten behindert – setzt jedoch einige Einschränkungen in der Durchtränkungszeit. Die Fließgeschwindigkeit der unterschiedlichen Fließfronten zwischen den Metallschichten ist unabhängig von der zwischen den Metallblechen befindlichen Gelegedicke, jedoch massgeblich durch deren Permeabilität, sowie durch die Oberflächenbeschaffenheit der angrenzenden Oberflächen bestimmt. Ein Vorausschleichen der äußersten Fließfronten entlang der Decklagen ist angesichts der abweichenden Oberflächenzustände möglich und durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden.

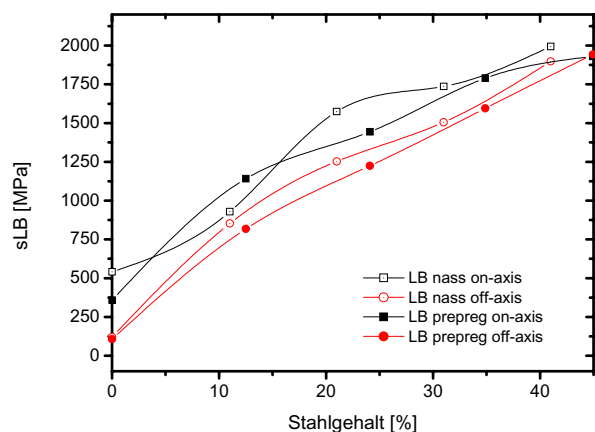


BILD 15. Lochleibungsfestigkeit von CFK/St-Nasslaminaten im Vergleich zu CFK/St-Prepreglaminaten bei on-axis und 90°-off-axis Belastung

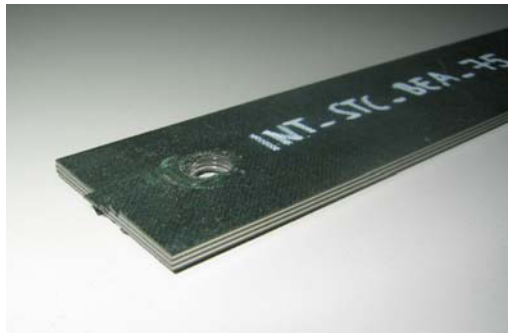


BILD 16. CFK/St Lochleibungsprobe mit 31% Stahlgehalt

6.5. Mehrreihige Bolzenverbindungen

Die statische Festigkeit von dreireihigen Bolzenverbindungen von CFK-Ti und CFK/St in Abhängigkeit variierenden Metallgehaltes ist in BILD 17 dargestellt⁵. Die maximale Tragfähigkeit der Verbindung bei 0°-on-axis Belastung wird schon bei geringen Titangehalten von 25%, bzw. bei Stahlgehalten von 35% erreicht. Hieraus folgt, dass der optimale Metallgehalt von der Anzahl der Bolzenreihen abhängig ist. Die absolute Festigkeit des optimalen CFK/Ti- und CFK/St-Laminats beträgt somit 191% bzw. 261% eines konventionellen Flugzeuglaminats [50/40/10].

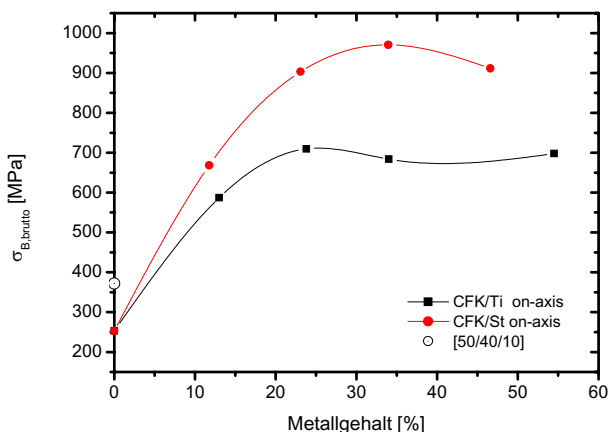


BILD 17. Bruchfestigkeit von dreireihigen Bolzenverbindungen an CFK/Ti und CFK/St

Die spezifische Bolzenverbindungsfestigkeit in Abhängigkeit des Metallgehaltes ist in BILD 18 dargestellt. Im Gegensatz zu den getesteten Lochleibungsproben liegt bei den 3-reihigen Bolzenverbindungen auch eine höhere spezifische Festigkeit im Vergleich zum konventionellen Flugzeuglaminat [50/40/10] vor. Beide Hybridlaminats weisen ähnliche spezifische Festigkeiten und eine maximale Verbesserung von etwa 30% gegenüber [50/40/10].

CFK/Ti Bolzenverbindungsproben wurden einer dynamischen Belastung entsprechend eines MINITWIST-Lastungskollektivs mit einer maximalen Oberspannung von 66% der statischen Festigkeit unterzogen. Diese überstanden schadensfrei 180000 simulierte Flüge, die fünf Flugzeugleben des Typs A320 entsprechen. Die Tragfähigkeitsermittlung nach der dynamischen Belastung ergab höhere

⁵ CFK/St: $e/d=3$, $w/d=4$, $p/d=3$
CFK/Ti: $e/d=3$, $w/d=4$, $p/d=4$

Restfestigkeiten im Vergleich zu den statischen Festigkeiten für Proben mit einem geringen Titangehalt.

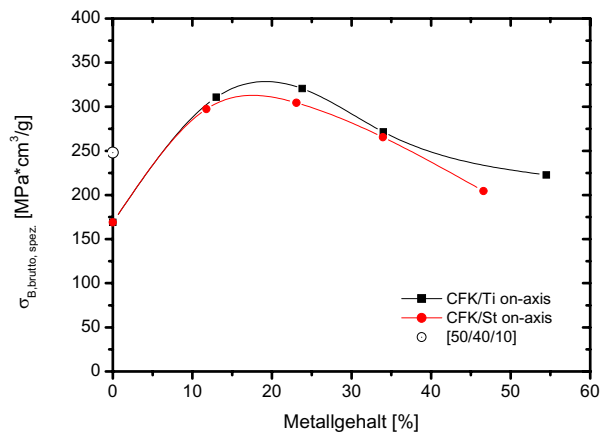


BILD 18. Spezifische Bruchfestigkeit von dreireihigen Bolzenverbindungen an CFK/Ti und CFK/St

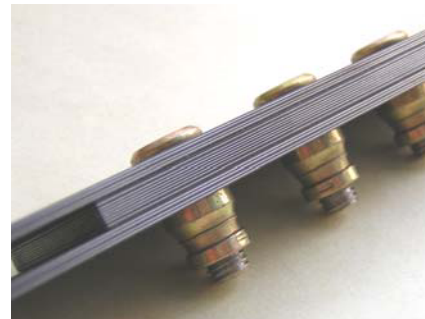


BILD 19. Dreireihige CFK/St Bolzenverbindungsprobe

6.6. Übergangsbereich

Die Gestaltung des Übergangsbereiches vom CFK-Grundlaminat zum lokalen Hybridlaminat ist ausschlaggebend für die Kopplungseffizienz dieser Verstärkungstechnik. Zwecks Vermeidung von Laminataufdickungen muss der Schichtersatz sorgfältig konfiguriert werden, um eine Anschlussgüte mindestens so hoch wie die des Bolzenverbindungsgebietes zu realisieren. Eine hohe und stabile Haftung der Schichten ist hierbei ebenso entscheidend wie eine sinnvolle Anordnung des diskreten Schichtersatzes.

Bei einer vorliegenden Hauptlastrichtung wird der Schichtersatz derart vorgenommen, dass erst weichere Schichten durch Metallschichten ausgetauscht werden. Zum Schluss, falls erforderlich, werden 0°-Schichten ersetzt.

Die ermittelten Anschlussgütegrade der Übergangsbereiche mit Schichtersatztechniken sind ausführlich untersucht worden. Für Grundlaminats [50/40/10] sind Anschlussgütegrade von 100%, für Grundlaminats [70/20/10] Anschlussgütegrade von 90% bei lokaler Verstärkung mit 50% Titan und unter Einsatz von 0.125mm starken Folien ermittelt worden (BILD 20) (Test bei RT). Bei einer Folienstärke von 0.25mm liegen niedrigere Anschlussgütegrade von 80% für das Grundlaminat [70/20/10] vor. Dies ist in den höheren Span-

nungskonzentrationen an jedem Schichtersatz zu begründen, die aus den dickeren ersetzten Schichten resultieren.

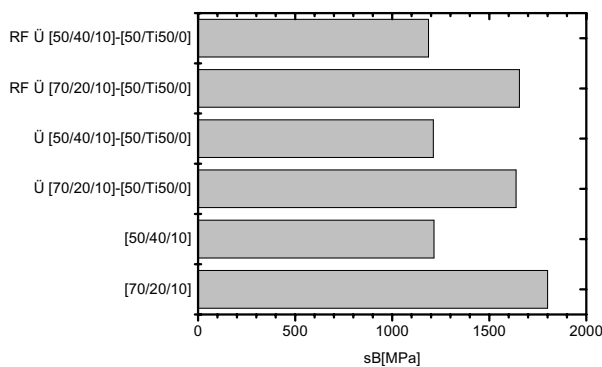


BILD 20. Statische Bruchfestigkeiten (Ü) und Restfestigkeiten von Übergangsbereichen (RF Ü) im Vergleich zu den CFK Basislaminaten (0.125mm Titan, RT).

BILD 21 zeigt den Übergangsbereich zwischen einem [70/20/10] Grundlaminat und einem [45,5/Ti 54,5/0] Hybridlaminat vor und nach dem statischen Bruchtest. BILD 22 zeigt ein Laminat ähnlicher Konfiguration unter Einsatz von 0.125mm starken Titanschichten.

Proben mit einem Übergang vom [70/20/10] und [50/40/10] Laminat zum CFK/Ti-Hybrid bestehend aus 50% Titan (Folienstärke 0.125mm) überlebten schadensfrei ein MINITWIST Belastungskollektiv aus 180000 Flüge. Die Restfestigkeit betrug 100% der statischen Festigkeit.



BILD 21. Übergangsbereich zum CFK/Ti Hybridlaminat vor und nach dem statischen Bruchtest



BILD 22. Übergangsbereich zum CFK/Ti Hybridlaminat unter Einsatz von 0.125mm Folien

7. SCHLUßFOLGERUNG UND ANWENDUNG

Die lokale Verstärkungstechnik mittels eingebetteten Metalllamellen durch Schichtersatz, aber auch durch Schichtzusatz, ist eine effektive Methode, um die Tragfähigkeit von Bolzenverbindungen an Faserverbundstrukturen zu erhöhen. Hieraus ergeben sich deutliche Gewichtseinsparungspotentiale durch Vermeidung von Aufdickungen, Verringerung der Größe und Anzahl der Verbindungselemente und der Größe von Anchlusselementen und Beschläge. Dieses Potential kann für die Entwicklung von Hochleistungsfaserverbundbauteilen genutzt werden, so z. B. für Druckbehälter (Beispiel MAN-CFK-Booster), Flügel- und Leitwerksanbindungen, Fahrwerks- und Triebwerksaufhängungen, sowie Fachwerkstreben- und Stringeranbindungen.

BILD 23 zeigt eine 20mm starke Demonstrationsschale mit ca. 20% Metallgehalt. Die Herstellung geschah per Harzinjektionstechnik.

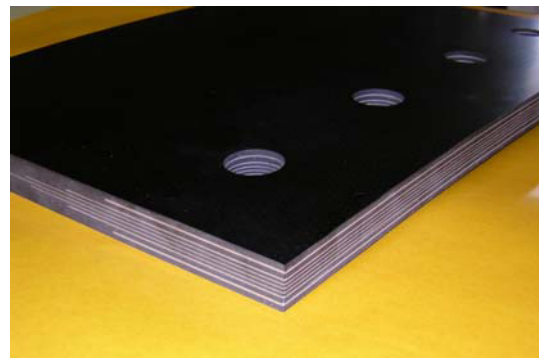


BILD 23. Schale mit lokaler Hybridisierung am Kopplungsbereich (Infusionsbauteil, 20mm Laminatstärke)

8. LITERATUR

- [1] Fink A., Kolesnikov B.: Hybrid Titanium Composite Material Improving Composite Structure Coupling, European Conference on Spacecraft Structures Materials and Mechanical Testing, ESA7ESTEC, Noordwijk (2005)
- [2] Liedke, Krause: Lochleibungsfestigkeiten an CFK-Laminaten bei zweischnittigen Bolzenverbindungen, Technische Niederschrift Deutsche Aerospace Airbus, (1994)
- [3] B. C. Hoskin, A.A. Baker: Composite Materials for Aircraft Structures, American Institute of Aeronautics and Astronautics (1986)
- [4] R. van Rooijen, Bearing Strength Characteristics of Standard and Steel Reinforced GLARE, Tu-Delft (2006)
- [5] Gerharz J, Schütz, D, Schwingfestigkeit von lösaren Krafteinleitungen in Faserverbundkonstruktionen, Bericht Nr. 3978 (1981)/BMVg-FBWT 82-7, LBF (1981)
- [6] E. Hence, H. Schneider, Statische Berechnung eines KFK-Flügelmodells (Biege-Torsionskasten) mit der Methode der Finiten Elementen und Vergleich mit Versuchswerten, DFVLR Stuttgart, Dornier, 7 Jahrestagung der Deutschen gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V., Kiel, Vortrag Nr. 74-118 (1974)
- [7] Sirotkin O.S., Rastrigin S.F., Koslow W.A., Experimentelle Untersuchungen von Charakteristiken der Elastizität

und der Festigkeit der CFK-Verbindungen bei dem freien und geklemmten Zustand (in russisch), TsAGI, Moskau, State University of Aerospace Technologies (1979)

- [8] Johnson W.S., Hybrid Titanium composite Laminates: a new aerospace material, NASA-Langley Research Center, 21th Annual Adhesion Society Meeting, (1998)
- [9] Worobeij W.W., Sirotkin O.S., Verbindungen für Konstruktionen aus Faserverbunden (in russisch), Maschinostroenie, Leningrad, State University of Aerospace Technologies, TsAGI (1985)
- [10] Abibow A.L., Wasiljew W.W., Kutjinow W.F., Sirotkin O.S., Projektierung der Verbindungen von Bauteilen aus Faserverbunden . Projektierung, Berechnung und Versuche von Bauteilen aus Faserverbunden, TsAGI, Moskau (1973)
- [11] Nadler M., Yoshino S., Darms F., Boron/epoxy Support Strut for Non-intgral Cryogenic Tankage, 15th Sampe-Symposium Los Angeles (1969)
- [12] Althof W., J. Müller, Untersuchungen an geklebten und lösbaren verbindungen von Faserverstärkten Kunststoffen, Kunststoffe 80, München, S. 911-916 (1970)
- [13] H. Lowak, J.B. de Jonge, J. Franz, d. Schütz, Minitwist, a shortened version of Twist, NLR MP 79018 U, National Aerospace Laboratory NLR, Amsterdam, The Netherlands (1979)
- [14] B, Kolesnikov, H. wilmes, A.S. Hermann, A. Pabsch, Verbundmaterial mit einem verstärkten verbindungsreich, Europäisches Patent Nr. 1082217, Patentinhaber DLR, 05.06.2002
- [15] HSB, Handbuch Strukturberechnung, 20110-01
- [16] HSB, Handbuch Strukturberechnung, 12571-01
- [17] Westre W. N. et al., Titanium-polymer hybrid laminates, US Patent 5866272A, The Boeing Company, 02.02.1999