

Anforderungsgerechte textile Halbzeuge und Z-verstärkte Preformen für Hochleistungsfaserverbundkeramiken

A. Kanschak, C. Anzer, F. Ficker

Anforderungsgerechte textile Halbzeuge und Z-verstärkte Preformen werden zukünftig eine immer größere Rolle bei der Herstellung effizienter Hochleistungsfaserverbundkeramiken spielen, um den gestiegenen Anforderungen u. a. für ihren Einsatz in den Bereichen Automotive, Energietechnik und Flugzeugbau (z. B. Fluggasturbinen) gerecht zu werden.

Im Rahmen der Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Technische Textilien für innovative Anwendungen und Produkte – NanoMatTextil“ wurden textile Carbonfaser-Preformen mit einer definierten Z-Verstärkung durch Vernadeln sowie mittels Tufting entwickelt. Als Halbzeuge wurden dabei unidirektional und biaxial verstärkte Non-Crimp-Fabrics, hochdrapierbare Gewebestrukturen, Radialgewebe mit lastgerechtem Faserverlauf, Krempel-Vliesstoffe sowie Vliese aus gehoppten Fasern eingesetzt. Die entwickelten Preformen dienen als Basis zur Herstellung von Faserverbundkeramiken nach unterschiedlichen Beschichtungs- und Keramisierungsverfahren. Die Resultate der Forschungsarbeiten belegen, dass sich auf der Basis Z-verstärkter textiler Preformen hochfeste Faserverbundwerkstoffe herstellen lassen. Gleichzeitig zeigt sich, dass Z-verstärkte Preformen zur Herstellung von Hochleistungsfaserverbundkeramiken ein hohes Maß an struktureller Anpassungsfähigkeit – wie Handlingfähigkeit, eine gezielt einstellbare Porengrößenverteilung und Faserdichte sowie ein Faservorzugsorientierung mitbringen müssen. Zudem ist es notwendig, derartige Hochleistungstextilien mit Faserschutzschichten zu versehen, um eine ausreichend hohe Schadenstoleranz und Festigkeit zu erzielen.

Einleitung

Der Einsatz von technischen Textilien ermöglicht eine Kosten- und Gewichtsreduzierung sowie eine Energieeinsparung von Bauteilen und Systemen. Die Verwendung von Kohlenstoff- und Keramikfasern bei der Textilherstellung gilt dabei als ein sehr innovativer Forschungsbereich, da Bauteile mit hoher massenspezifischer Festigkeit und hoher Steifigkeit realisiert werden können. Die hohe Sprödigkeit dieser Fasern machen intensive Forschungsarbeiten zur schädigungsarmen textilen Verarbeitung notwendig.

Neuartige Anwendungen für Ceramic Matrix Composites (CMC) sind unter anderem Null-Ausdehnungssysteme für Spiegelträger. Solche Tragstrukturen sind hochsteif, schadenstolerant, besitzen ein angepasstes Ausdehnungsverhalten und werden in der Raumfahrt eingesetzt.

Mit klassischen 2D-verstärkten CMC-Bauteilen ist diese Anforderung aufgrund der Anisotropie des Faseraufbaus jedoch schwierig zu realisieren. Allerdings zeigten Kumara et al. [1], dass durch eine angepasste textile Verarbeitung, beispielsweise mittels orthogonalen Webens, gezielt Einfluss auf das Ausdehnungsverhalten genommen werden kann. Die große Bedeutung von Z-verstärkten Preformen machen Shangwu Fan et al. [2] am Beispiel von Werkstoffen für Flugzeugbremsysteme deutlich.

Problematisch für die Keramikindustrie ist die nach wie vor geringe kommerzielle Verfügbarkeit Z-verstärkter Preformen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des BMBF-Projekts „CaGeFa“ textile Preformen entwickelt, die eine Reduzierung von Prozesszeiten und -kosten bei gleichzeitiger Optimierung des Eigenschaftsprofils ermöglichen und die Kommerzialisierung von

Faserverbundkeramiken vorantreiben. Innovative textile Verarbeitungstechnologien waren und sind auch zukünftig für die Herstellung komplexer Keramikstrukturen ent-

Alexander Kanschak
Fraunhofer ISC
Zentrum Hochtemperatur-Leichtbau HTL
95448 Bayreuth

Corinna Anzer, Frank Ficker
Hochschule für angewandte
Wissenschaften Hof
95028 Hof

Korrespondenzautor: A. Kanschak
E-Mail: kanschak@isc.fraunhofer.de

Keywords: CMC, C/SiC-Bauteile, Turbine, LSI, Preform, Textil

Tab. 1 Verwendung textiler Halbzeuge und Z-verstärkte Preformen sowie Arten ihrer Keramisierung bei der Herstellung unterschiedlicher Faserverbundkeramiken

Keramisierung	LSI-Verfahren		PIP-Route		r-CVI-PyC
Eingesetzte Textile Halbzeuge	6 Gewebelagen (420 g/m ²) T700-Carbonfaser 12k				Kombination aus Carbonvlies NCF Gewebe gechopptes Vlies
Textile Z-Verstärkung	Tufting				Vernadeln
Beschichtungsart	CVI-PyC	CVI-PyC	Nasschem. 5 % Phenol	Nasschem. BN/SiC	–
Matrixsystem	PF-Phenolharz	SiC-Precursor		PyC	
Formgebung	Warmpresse	Autoklav		–	
HT-Prozess	Pyrolyse + Kapillarsilizierung	Pyrolyse		r-CVI	
Faserverbundkeramik	C/C–SiSiC	C/SiC		CFC	

scheidend, unter anderem, weil sich damit eine große Bandbreite an unterschiedlichen Fasermaterialien – nicht nur Carbonfasern, sondern auch oxidische Keramikfasern und SiC-Fasern – einsetzen lassen. Eine Weiterentwicklung solcher textiler Verarbeitungstechnologien mit bereits in Z-Richtung verstärkten textilen Halbzeugen und Preformen [3] wird zukünftig immer wichtiger, damit Hochleistungsfaserverbundkeramiken neuen Anforderungen für den Einsatz, beispielsweise im Bereich Automotive und Fluggasturbinen, gerecht werden.

Zur Einstellung des Interface bei Faserverbundwerkstoffen werden Faserbeschichtungen eingesetzt. Die Stoffsysteme, die sich bis dato bewährt haben, sind PyC (pyrolytischer Kohlenstoff) und BN [4]. Nach Stand der Technik werden diese Beschichtungen über einen CVD-Prozess (CVD: Chemical Vapour Deposition) auf die einzelnen Filamente aufgetragen. Eine PyC-Beschichtung textiler Halbzeuge und Preformen im Volumen hingegen wird über das CVI-Verfahren (CVI: Chemical Vapour Infiltration) erreicht. Bei zu dichten textilen Preformen besteht die Schwierigkeit darin, zu vermeiden, dass in bestimmten Bereichen der Preformen durch eine Verbrückung von Faseroberflächen die Gasphasenabscheidung von PyC gehemmt wird oder vollständig zum Erliegen kommt.

Ist der Faservolumengehalt der textilen Preform hingegen zu gering, fehlt die nötige Festigkeit nach dem CVI-Prozess. Zu alternativen kostengünstigen Beschichtungsverfahren zählen einfache Tauch- und Tränkverfahren, wie nasschemische Verfahren,

die im Rahmen der Arbeiten angewandt wurden.

Das Projekt ordnet sich in den Forschungsschwerpunkt der Entwicklung neuer textiler Halbzeuge und Z-verstärkter Preformen aus Carbonfasern ein. In die Arbeiten fließt die Herstellung anforderungsgerechter Textilien, insbesondere Non-Crimp-Fabrics, Gewebe und Vliesstoffe (Nonwovens) einschließlich der Prozesstechnologie und der Einsatz neuer Materialien im Fertigungsprozess ein. Durch die nachfolgende Vernadlung der Halbzeuge [4] wird eine definierte Z-Verstärkung durch Umorientierung der Fasern erreicht, so dass die geforderten Eigenschaften wie Strukturdichte, Lagenhaftung und Imprägnierverhalten für die nachfolgende Keramisierung gezielt einstellbar sind. Je nach Anwendungsfall ist es möglich, die Strukturdichte der Faserpakete über den Querschnittsaufbau variabel zu gestalten. Dies erfordert eine spezielle Lagenauswahl in Hinblick auf Faserorientierung und Faserdichte sowie eine angepasste Festlegung der Nadelparame-ter, da die konventionelle Vernadelungstechnik auf Grund der hohen Sprödigkeit von Carbon nur bedingt für die Verbindung variabler Lagenaufbauten geeignet ist. Beim Tuftingverfahren, welches im Projekt ebenfalls für die Verbindung von Gewebelagen eingesetzt wurde, wird ein Carbonfaden zur Z-Verstärkung in definierten Abständen eingestochen.

Mit dem Projekt „Anforderungsgerechte hochdrapierbare Carbon-Gelege-Faser-Preformen für effiziente Faserverbundkeramiken“ wurden die Bereiche der Textilindustrie mit der Keramikindustrie innovativ

miteinander und zum gegenseitigen Nutzen vernetzt. Dabei stehen die neuartigen technischen Textilien und Preformen sowie deren textile Verarbeitung durch Vernadeln oder Tuften auf der einen Seite der Keramikindustrie mit ihren Beschichtungs- und Keramisierungsverfahren auf der anderen Seite gegenüber.

Bereits bekannte textile sowie keramische Verfahren wurden dabei angewendet und weiterentwickelt. Die Wirkung sowohl der textilen Verarbeitung als auch der Beschichtung wurde prozessbegleitend sowohl qualitativ mittels Computertomographie (CT) untersucht, als auch deren quantitativer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften durch eine mechanische Prüfung der resultierenden Faserverbundkeramiken gemessen.

Arbeiten

Die Entwicklungsarbeiten im Rahmen der Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Technische Textilien für innovative Anwendungen und Produkte – NanoMatTextil“ umfassten die gesamte Prozesskette beginnend mit der Rovingauswahl über dessen textile Verarbeitung, Preformherstellung, Beschichtung sowie dem Matrixaufbau über die Hochtemperaturprozessierung zur fertigen Faserverbundkeramik (Tab. 1). Entlang dieser Prozesskette wurden die Arbeiten entsprechend in die drei Teilschritte Textile Halbzeug- und Preformentwicklung; Beschichtung sowie Keramisierung unterteilt.

Im Rahmen der textilen Halbzeug- und Preformentwicklung wurden unterschiedliche textile Halbzeuge und Z-verstärkte Preformen hergestellt. Die Fa. Gerster entwickelte auf Basis eines 12K T700-Carbonfaserrovings Gewebe mit einer Flächenmasse von 420 g/m² für den Tufting- und Vernadelungsprozess. Darüber hinaus wurden 12K T700-Fasern z. T. in Kombination mit Pech-basierten Fasern zu ondulationsfreien NCF und Radialgewebe mit lastgerechtem Faserlauf verarbeitet.

Die Fa. Tenowo stellte entsprechend Carbonflore und Maliwattstrukturen auf Basis der T700-Fasern her. Des Weiteren wurden an der TU Dresden Versuche zur Erzeugung von Vliesen mit einer quasi-isotropen und anisotropen Faserverteilung gechoppeter Fasern umgesetzt, welche in den Preformen eingesetzt wurden.

Zur Herstellung von Z-verstärkten Preformen wurden mittels Tuften bei der Fa. Airbus jeweils 6 Lagen des 420 g/m²-T700-Gewebes mit einem verdrehten 6K T800-Nähgarn im Abstand von jeweils ca. 10 mm miteinander vernäht. Über das Vernadeln mit Nadeln der Fa. Groz-Beckert bei der Fa. FTA sowie an der HS Hof hergestellte Z-verstärkte Sandwich-Preformen wurden aus einer Abfolge aus T700-Carbonvliesstofflagen, gehoppten Vliesen sowie NCF- und Gewebelagen zu einem Lagenpaket verbunden. Weiterhin wurde an der HS Hof eine Füge-technologie zur Verbindung von Sandwich-Preformen mit Radialgeweben entwickelt.

Die über das Tuften in Z-Richtung verstärkten Preformen wurden anschließend mit jeweils unterschiedlichen Methoden entsprechend der vorgesehenen späteren Keramikisierungsroute beschichtet. Ziel war es, die zugänglichen Faseroberflächen im Volumen der Preform so zu modifizieren, dass diese nicht durch die jeweils vorgesehenen nachfolgenden Hochtemperaturprozessschritte, wie beispielsweise der Kapillarsilizierung, geschädigt werden. Zudem sollte der Einfluss auf die Stärke der Fasermatrixbindung (FMB) bewertet werden – einem wesentlichen Schlüssel für ein späteres schadenstolerantes Verhalten in der Faserverbundkeramik. Dabei wurden bei den Firmen CVT und SKT über das CVI-Verfahren PyC-Schichten bis 300 nm auf den Faseroberflächen der in Z-Richtung verstärkten Preformen abgedichtet. Alternativ wurde ein kostengünstiges Tauchverfahren des CME-Lehrstuhls der Uni Bayreuth angewendet, in dem ein Phenolharzfilm appliziert wurde, sowie durch das Fraunhofer-Zentrum HTL eine nasschemische Beschichtung auf der Basis von BN und SiC-Precursoren getestet. Nach der Beschichtung erfolgte der Matrixaufbau der über das Tuften Z-verstärkten Preformen, und zwar auf der einen Seite über ein flüssiges Phenolharz für eine vorgesehene Kapillarsilizierung nach dem LSI-Verfahren (LSI: Liquid Silicon Infiltration), sowie auf der anderen Seite über ein SiC-Prepolymer für eine PIP-Prozessierung (PIP: Polymer Infiltration Pyrolyse). Bei den durch Vernadeln verstärkten Preformen erfolgte der Matrixaufbau direkt über eine Gasphasenabscheidung von PyC mittels r-CVI-Verfahren bei der Fa. CVT zur Herstellung eines Carbonbauteils.

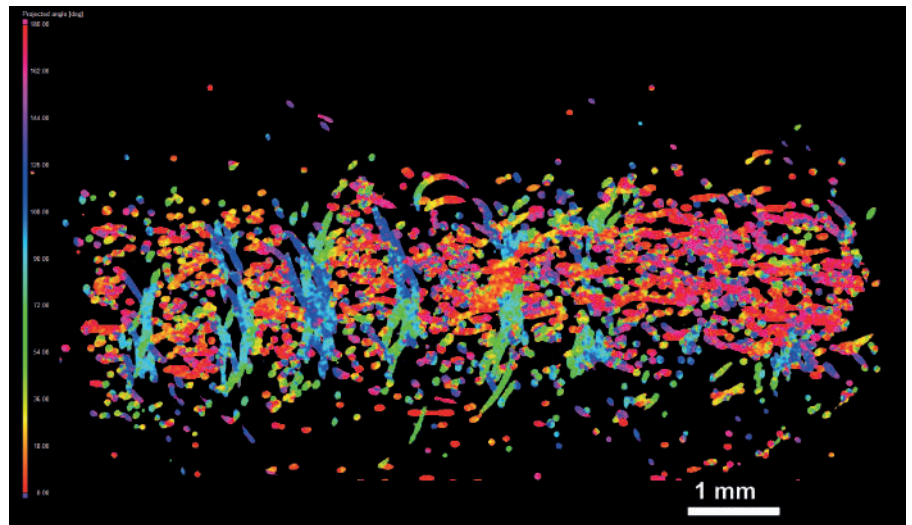


Bild 1 Bei FTA vernadelter in Z-Richtung verstärkter polymerer Modellwerkstoff im CT-Schnittbild in ZX-Raumebene mit entsprechender projizierter Winkelverteilung (Voxel Auflösung 5 µm)

Entlang der Prozesskette wurden die unterschiedlichen Materialzustände mit diversen Prüfverfahren prozessbegleitend charakterisiert und bewertet. Zu den verwendeten Prüfverfahren zählten dabei neben der zerstörungsfreien Computertomographie auch die zerstörende mechanische Prüfung mittels Universalprüfmaschine. Ziel der Untersuchungen an textilen Halbzeugen und Z-verstärkten Preformen war es, qualitativ die Wirkung textiler Verarbeitungstechnologie auf das jeweilige textile Halbzeug (Vliesstoff, NCF oder Gewebe) oder ihrer Kombination zu ermitteln und entsprechend zu bewerten. Dabei sollten auftretende Änderungen des textilen Lagenaufbaus (Faserdichte, Faserorientierung), Lagenabfolge (ggf. gradierte Strukturdichte) oder Schädigung durch die textile Verarbeitung, beispielsweise durch ein Vernadeln mit unterschiedlichen Nadelparametern (Nadelauswahl, Nadeldichte, Hubanzahl, Einstichtiefe), zerstörungsfrei durch Computertomographie (CT) entsprechend den Raumrichtungen erfasst werden. Dabei entspricht die Y-Achse der Produktionsrichtung, die X-Achse beschreibt den Verlauf in 90°-Orientierung zur Produktionsrichtung und die Z-Achse entspricht der Oberflächennormalen oder Dicke.

Ergebnisse

Die Herausforderung bei der Herstellung von in Z-Richtung miteinander textiltechnisch verbundenen Halbzeugen ist es, eine optimale Umlenkung von Verstärkungsfa-

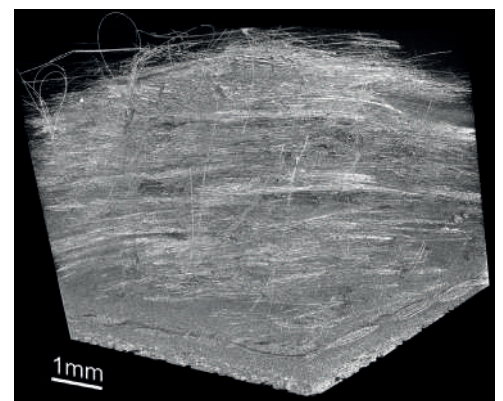
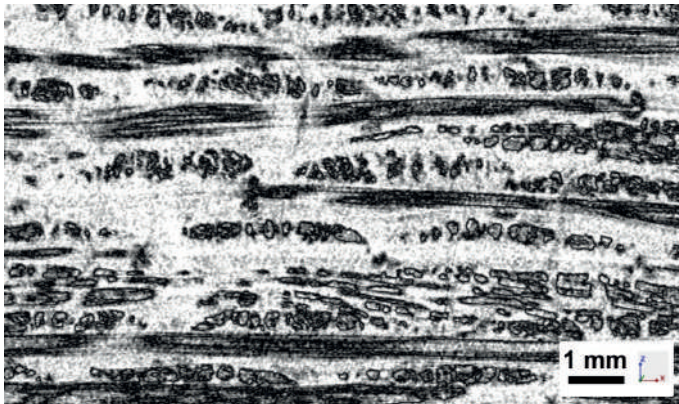


Bild 2 Bei Fa. FTA vernadeltes Carbonvlies 1N2x115E_150213 mit Umlenkung von einzelnen Carbonfasern in Z-Richtung sowie markante Schlaufenbildung auf der Oberseite des Carbonvlieses; räumlicher 3D-CT-Ausschnitt mit einer Voxel Auflösung von 4,8 µm

sern bei gleichzeitig minimaler Faserschädigung zu erreichen. Zum Verständnis aufbau solcher Mechanismen wurde der Vernadelungsvorgang mit Hilfe von polymerem textilen Fasermaterial durch die Fa. FTA modelliert, unter anderem auf der Basis von 3D-Daten aus CT-Messungen des Materials mit einer Auflösung von 5 µm (Bild 1). Gut erkennbar war dabei die Umlenkung der Fasern in Z-Richtung, die im erzeugten CT-Volumen über eine Faserorientierungsanalyse entsprechenden Umlenkungswinkeln zugeordnet werden konnte.

CT-Messungen an vernadelten T700-basierten Carbonvliesen zeigen eine Spreizung und Schädigung bzw. Verkürzung

Initiale textile Halbzeugdicke <10 mm



Initiale textile Halbzeugdicke >10 mm

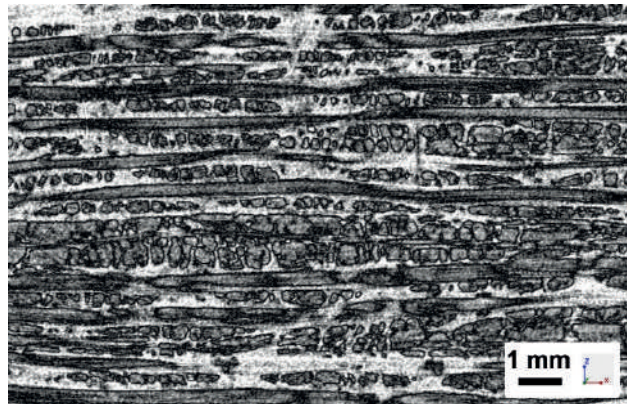


Bild 3 CT-Schnittbilder (XZ-Schnitt) von Z-verstärkten Preformen mit 16 µm Auflösung: Auflockerung (l.) und Verdichtung (r.) der textilen Struktur durch die Vernadelung bei gleichen Vernadelungsparametern durch unterschiedliche initiale textile Halbzeugdicken

von Faserlängen in vorhandenen Faserbündeln. Die Umlenkung von Carbonfasern in Z-Richtung erfolgt dabei in Abhängigkeit von Nadelauswahl und festgelegten Maschinenparametern.

Bild 2 zeigt die innere Struktur bei Einsatz einer Nadel mit geringer Kerbgröße und kleiner Arbeitsteilhöhe. Dabei werden Einzelfasern umgelenkt, sodass eine homogene Materialstruktur entsteht. Die gewählte RF-Kerbe ermöglicht einen schonenden Fasertransport.

Wird eine Nadeltypen für effiziente Umorientierung mit hoher Kerbtiefe und einer großen Arbeitsteilhöhe verwendet, werden ganze Faserbündel umgelenkt, woraus eine definierte Z-Verstärkung resultiert. Durch den Vernadelungsprozess kommt es bei dieser Nadelauswahl lokal zu einer verstärkten Reduzierung und an anderer Stelle zu einer Erhöhung der Strukturdicke im Carbonvlies.

Dabei wurden auf Basis der CT-Messung erstmals Unterschiede in der Struktur der Umlenkung in unterschiedliche Raumrichtungen festgestellt. Während die in Z-Richtung umgelenkten Carbonfasern im YZ-Schnitt, also in Kettrichtung, als V-förmige Spitztrichter ausgeprägt sind, zeigte sich die Umlenkung der Carbonfasern im XZ-Schnitt als U-förmiger Rundtrichter. Grund für die unterschiedliche Form liegt im Vorschub des textilen Halbzeuges während der Vernadelung.

Es zeigt sich, dass die textile Strukturdicke von Carbonvlies im Kern und auf der Unterseite an der Oberfläche durch die Vernadelung erhöht wird. Durch den Eingriff der Nadeln bei gleichzeitigem Vliesabzug wird

die Trichterbildung bei der konventionellen Vernadelungstechnik begünstigt, bei der Bereiche mit lokaler Dichteerhöhung bzw. Dichtereduzierung entstehen. Eine deutliche Reduzierung der Einstichtrichter und damit eine Homogenisierung der Strukturdicke kann durch den Einsatz der elliptischen Vernadelungstechnologie erreicht werden.

Neben vernadeltem Vlies wurden an der HS Hof auch vernadelte Sandwiches hergestellt und untersucht. Hier wurden ebenfalls deutlich sichtbare Faserumlenkungen unter Ausprägung von V-förmigen Spitztrichtern nachgewiesen.

Die Untersuchung der textilen Halbzeuge zeigt, dass die zur Vernadelung vorgesehene initiale Schichtdicke der textilen Halbzeuge bei identischen Vernadelungsparametern einen großen Einfluss hat. So werden zu dünne textile Schichtverbunde durch eine Vernadelung aufgelockert und strukturell ausgedünnt. Textile Schichtverbunde mit einer Dicke >10 mm lassen sich hingegen durch die Z-Verstärkung zusätzlich verdichten (Bild 3).

Bei den Sandwichstrukturen nimmt die Dichte als bedeutsamer Parameter für die Infiltrierbarkeit im CVI-Prozess einen hohen Stellenwert ein. Die Preformdicke kann vor allem durch die Einstichdicke sowie die Materialauswahl beeinflusst werden. Je geringer die Einstichdicke dabei ist, desto höher ist die Preformdicke.

Im Rahmen der Versuchsreihen wurde ein Optimum der Einstichdicke ermittelt, welche die für die Keramisierung notwendige Haftung bei gleichzeitig hoher Strukturdicke ohne Hinderung des Gastransports garantiert. So beträgt die Preformdicke

0,32 g/cm³ bei 8 Lagen und einer Einstichdicke von 100 Einstichen/cm². Zum Vergleich liegt die Preformdicke bei gleicher Lagenanzahl und einer Einstichdicke von 30 Einstichen/cm² bei 0,47 g/cm³.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei hoher Einstichdicke eine Volumenzunahme der Sandwichstruktur durch die Schädigung der textilen Halbzeuge auftritt. Die Lagenhaftung wird neben Einstichtiefe und Einstichdicke maßgeblich von den eingesetzten Halbzeugen beeinflusst. Gelege bieten im Vergleich zu Geweben den Vorteil, dass eine Faserumlenkung durch die Anbindung mittels Bindefäden sowie eine geringere Faserreibung leichter zu ermöglichen ist. Dadurch ist eine geringere Einstichdicke notwendig, was eine reduzierte Faserschädigung nach sich zieht.

Mit der eingestellten Preform-Dichte von 0,60 g/cm³ lässt sich durch die über die Vernadelung eingebrachten Kanäle, die den Gastransport begünstigen, eine wirtschaftliche Infiltration mit geringeren Prozesszeiten im Vergleich zu am Markt verfügbaren Strukturen erreichen.

Die Z-verstärkten Preformen wurden im Anschluss unterschiedlich beschichtet und mit einem Matrixsystem gefüllt (Tab. 1). Dabei zeigte sich, dass das in Z-Richtung durch Tuften verstärkte eingesetzte klassische 420 g/m² Gewebe auf Basis von 12k T700-Carbonfaser aufgrund der dichten Faserstruktur die Neigung aller Beschichtungsmethoden zu einer Verbrückung benachbarter Faseroberflächen noch verstärkte. Alle nachfolgenden Matrixaufbauverfahren waren damit ebenso qualitativ beeinflusst. Eine Vernadelung lokal aufge-

Tab. 2 Ermittelte mechanische CMC-Kennwerte auf der Basis einer Z-verstärkten Preformvariante aus 6 getufteten Gewebelagen T700S 12000-50C 800tex in 2/2 Körperbindung hergestellt nach unterschiedlichen Beschichtungs- und Keramisierungsrouten (je n = 5 Prüfkörper)

Bezeichnung	Beschichtung	Matrixsystem	CMC-Route	ILSS 3 Pkt.-Kurz [MPa]	Biegefestigkeit 3 Pkt-Lang [MPa]	ε Fm ax [%]	Zugfestigkeit [MPa]	ε Fm ax [%]
LSI PF H12 II X	PyC	Phenolharz	LSI	3,94 ± 0,46	40,29 ± 5,60	0,25 ± 0,02	n. a.	n. a.
LSI PF H12 II Y	PyC	Phenolharz	LSI	6,45 ± 1,34	61,63 ± 8,29	0,42 ± 0,07	n. a.	n. a.
LSI PF H15 II X	PyC	Phenolharz	LSI	12,05 ± 0,76	24,51 ± 2,56	0,33 ± 0,06	9,3 ± 1,3	0,04
LSI PF H15 II Y	PyC	Phenolharz	LSI	10,54 ± 2,28	16,37 ± 5,21	0,40 ± 0,17	6,1 ± 1,5	0,04
PIP 5 % Phenol II X	5 % Phenolharz	SiC-Precursor	PIP	3,91 ± 0,55	140,43 ± 12,91	1,21 ± 0,24	212,63 ± 22	n. a.
PIP 5 % Phenol II Y	5 % Phenolharz	SiC-Precursor	PIP	2,41 ± 0,87	120,83 ± 10,51	0,99 ± 0,16	205,18 ± 19	n. a.
PIP P1 r - CV I II X	PyC	SiC-Precursor	PIP	17,34 ± 2,24	250,89 ± 22,36	3,88 ± 1,07	211,3 ± 38	0,63 ± 0,03
PIP P1 r - CV I II Y	PyC	SiC-Precursor	PIP	20,98 ± 0,87	267,27 ± 26,83	3,48 ± 0,52	n. a.	n. a.
PIP P2 r - CV I II X	PyC	SiC-Precursor	PIP	15,95 ± 2,43	246,08 ± 46,62	1,07 ± 0,15	222,5 ± 27,2	0,4 ± 0,2
PIP P2 r - CV I II Y	PyC	SiC-Precursor	PIP	20,06 ± 1,26	284,68 ± 25,12	1,07 ± 0,19	257,9 ± 46,7	0,3 ± 0,2
PIP P10 CVI II X	PyC	SiC-Precursor	PIP	13,46 ± 1,99	187,62 ± 21,33	0,96 ± 0,16	214,9 ± 27,3	0,6 ± 0,1
PIP P10 CVI II Y	PyC	SiC-Precursor	PIP	17,71 ± 1,99	209,90 ± 52,86	0,87 ± 0,19	289,2 ± 81,6	0,7 ± 0,1

lockerer Z-verstärkter Preformen auf der Basis von T700-Carbonvlies hingegen wirkte sich positiv aus und garantierte zudem eine gute Erreichbarkeit der Z-verstärkten Preform durch die eingesetzten Matrixsysteme (Tab. 1).

Das Fasergewebe des Typs T700S 12000-50C 800tex in 2/2 Körperbindung als Basis von in Z-Richtung verstärkten textilen Schichtstapeln war für eine auf Benetzung jeder einzelnen Carbonfaseroberfläche ausgelegten nasschemischen Beschichtung zu dicht. Hier kam es zu einer ausgeprägten Verbrückung von Carbonfasern durch das Beschichtungsmaterial (Bild 5). Hier wird bei Anwendung des nasschemischen Beschichtungsverfahrens zukünftig eine erneut angepasste textile Preform notwendig, in der sich die einzelnen Fasern in einem gewissen Abstand zueinander befinden. Optimal wäre ein Abstand zwischen den Einzelfasern von mindestens etwa einem halben Faserdurchmesser von etwa 4 µm. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Faserorientierung wurde nachfolgend der Einfluss der textil erzeugten Verstärkungsstruktur auf die mechanischen Eigenschaften der Faserverbundkeramiken untersucht. Mechanische Festigkeiten wurden an von durch Fa. SKT hergestellten Prüfkörpern in Anlehnung an DIN EN 658-3 & 5 sowie an DIN EN

658-1 mit einer Universalprüfmaschine der Fa. Hegewald & Peschke an jeweils n = 5 Proben ermittelt (Tab. 2). Bei Verwendung einer Z-verstärkten textilen Preformvariante auf der Basis von sechs getufteten 12K-Gewebelagen zeigt sich, dass ein Preformtyp nicht für alle Routen der CMC-Herstellung mit jeweils unterschiedlichen Faserbeschichtungen und Matrices geeignet ist.

Mit dem für Carbonfasern schonenden, jedoch aufwendigen Polymer Infiltrations-Pyrolyse (PIP)-Verfahren, bei dem eine PyC-beschichtete Z-verstärkte Preform bis zu zehnmal mit einem SiC-Precursor nachimprägniert wird, ließen sich hohe Biege- und Zugfestigkeiten der resultierenden Faserverbundkeramik von bis über 300 MPa erreichen. Dies belegt, dass bei

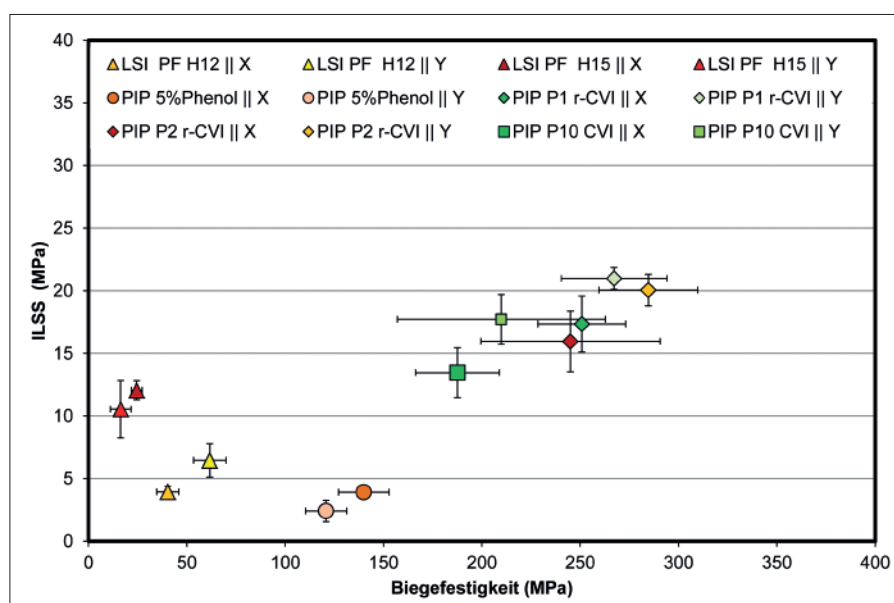


Bild 4 ILSS vs. 3-Pkt. Lang-Biegefestigkeiten von unterschiedlichen Faserverbundkeramiken auf der Basis einer getufteten Z-verstärkten Preform

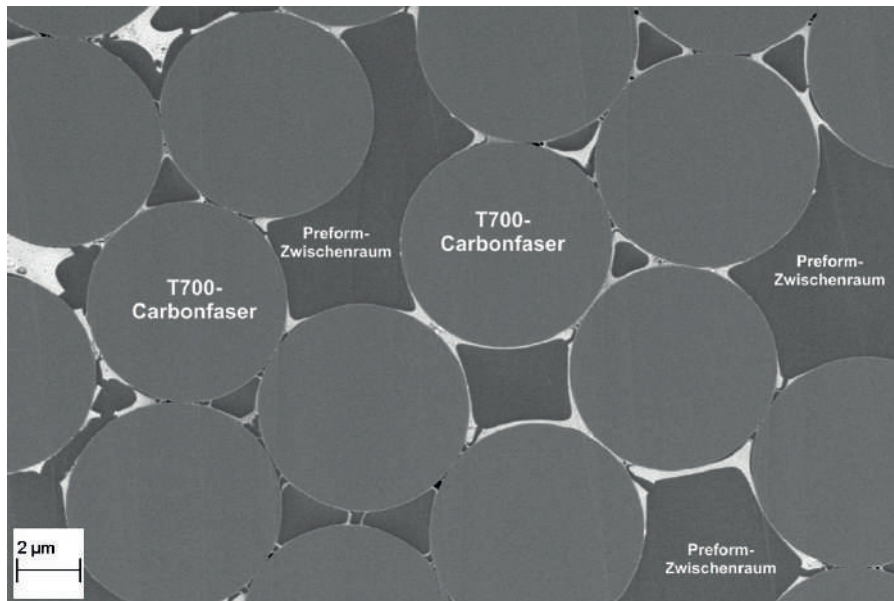


Bild 5 REM Aufnahme vom Querschnitt einer mittels CSP-Verfahren präparierten getufteten Z-verstärkten T700-basierten Gewebe-Preform mit Verbrückungen nach einer nasschemischen BN/SiC-Beschichtung mit sich unmittelbar verbrückten Faseroberflächen durch zu dichte Faserstruktur

entsprechend angepasstem Matrixaufbau mit in Z-Richtung verstärkten textilen Preformen auf der Basis von getufteten T700-Geweben hohe mechanische Kennwerte erzielt werden können (Tab. 2, Bild 4). Die eingebrachte Z-Verstärkung wirkt dabei in der Faserverbundkeramik auch bei einer für sie ungünstigen Richtung mechanischer Beanspruchung unter Zug keinesfalls schwächend oder gar als Sollbruchstelle.

Des Weiteren ist durch eine Faserbeschichtung die Einflussnahme auf die Faser-Matrixbindung möglich, was eine hohe Schadenstoleranz bewirkt. Die ermittelten Kennwerte zeigen jedoch gleichzeitig auch, dass eine in Z-Richtung verstärkte Preform nicht für alle Verfahren der Keramikherstellung gleichermaßen gut geeignet ist und für jede entsprechende Keramisierungsmethode eine anforderungsgerechte textile Preform notwendig ist.

So ist die in Z-Richtung durch Tuften verstärkte Preform auf der Basis dichter Gewebe nachteilig für die Anwendung von

flüssigen Phenolharzen als Matrix- (LSI PFH12-15 in Tab. 2) oder als Beschichtungssystem (PIP 5 % Phenol in Tab. 2), da hier durch Verbrückung große Poren ausgebildet sind und Materialdefekte somit die mechanischen Festigkeitseigenschaften negativ beeinflussen (Bild 5). Oberflächen der Carbonfasern werden nicht mehr geschützt, und so kommt es bei einer Kapillarsilizierung (LSI) zur völligen Umsetzung zugfester Carbonfasern zu SiC. Dies erklärt die sehr niedrigen resultierenden Festigkeiten und interlaminaren Scherfestigkeiten <12 MPa des LSI-prozessierten C/C-SiSiC (Tab. 2, LSI PF).

Hohe mechanische Kennwerte in der Faserverbundkeramik werden mit Z-verstärkten Preformen jedoch erreicht, wenn textile Struktur, Faserbeschichtung, Matrixaufbau und die CMC-Route aufeinander abgestimmt sind (Tab. 2, PIP P1 r-CVI). So lassen sich mit Z-verstärkten Preformen neben hohen mechanischen Kennwerten gleichzeitig eine hohe Schadenstoleranz und damit eine

hohe Betriebssicherheit von Hochleistungsfaserverbundkeramiken erzielen.

Die durchgeführten Arbeiten zeigen dabei auch, dass eine anforderungsgerechte Herstellung von Z-verstärkten Preformen realisiert werden kann. Durch Nadelauswahl, Preformaufbau und Vernadelungsparameter wird eine Variation von Infiltrationsverhalten, Dichte und innerer Materialstruktur erzielt. Insbesondere die Sandwichstrukturen, die für den CVT-Prozess entwickelt wurden, begünstigen durch die über die Vernadelung eingebrachten Kanäle den Gastransport und erlauben dabei eine wirtschaftliche Infiltration mit geringeren Prozesszeiten im Vergleich zu marktverfügbaren Strukturen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projekts innerhalb der Maßnahme „Technische Textilien für innovative Anwendungen und Produkte – Nano-MatTextil“ (Förderkennzeichen 03X0143A - 03X0143K). Weiterhin möchten die Autoren den beteiligten Projektpartnern Airbus, SKT, ECM, CVT, Gerster, Tenowo, FTA, TU Dresden sowie dem Keramischen Lehrstuhl der Universität Bayreuth für die gute zielorientierte Zusammenarbeit danken.

Literatur

- [1] Kumara, S.; et al.: Preparation of 3D orthogonal woven C-SiC composite and its characterization for thermo-mechanical properties. *Mater. Sci. and Engineering A* **528** (2011) 6210–6216
- [2] Fan, S.; et al.: Progress of ceramic matrix composites brake materials for aircraft application. *Rev. Adv. Mater. Sci.* **44** (2016) 313–325
- [3] Xiao, P.; Li, Z.; Xiong, X.: Microstructure and tribological properties of 3D needle-punched C/C-SiC brake composite. *J. of Solid State Sci.* **12** (2010) [4] 617–623
- [4] Kerans, R. J.; et al.: Interface Design for Oxidation-Resistant Ceramic Composites. *J. of the Amer. Ceram. Soc.* **85** (2002) [11] 2599–2632