001181

2002

44. Jahrgang

www.hanser.de/mp

Organ der
Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung
Berlin (BAM)

*MATERIALS
TESTING*

MATERIALPRÜFUNG

Werkstoffe und Bauteile,
Technologien und Anwendungen

Autoren-Fortdruck

Alle Rechte, auch die
des Nachdrucks, der
photomechanischen
Wiedergabe
dieses Sonderdrucks
und der Übersetzung,
behält sich
der Verlag vor.

Carl Hanser Verlag
München

CFK-Zugelemente verankern

Ein System zur Erzeugung eines gleichmäßigen Zugspannungsfelds

Mehdi Farshad,
Patrick Rossini und Peter Flüeler,
Dübendorf/Schweiz

In diesem Beitrag wird ein neues Verankerungssystem für Zug-elemente aus Verbundwerkstoffen vorgestellt. Dieses Verankerungssystem reduziert die Möglichkeit des vorzeitigen Versagens am Ende der Zugelemente, das durch Spannungskonzentration erzeugt werden könnte. Der Mechanismus des Systems basiert auf einer speziellen Einleitung der Zugkräfte am Ende des Zugelements, um ein gleichmäßiges Zugspannungsfeld zu produzieren. Hierzu wird auf die Ergebnisse der vergleichenden Zugprüfung an CFK-Lamellen sowie auf Finite-Elemente-Simulationen eingegangen. Verschiedene neu konzipierte Verankerungssysteme wurden durch Zugversuche an CFK-Lamellen erprobt und mit dem Standard-Verankerungssystem experimentell und theoretisch verglichen. Eines der neuen Verankerungssysteme zeigt Verbesserungen gegenüber der Standard-Einspannung. Es kann für die Verbesserung des Zug-Prüfverfahrens für CFK-Lamine, die Verbesserung der Krafteinleitung bei geklebten, externen CFK-Verstärkungen und die Vorspannung von Zugelementen bei Schrägseilbrücken eingesetzt werden.

In den letzten Jahren werden Verbundwerkstoffe immer breiter in unterschiedlichen Gebieten eingesetzt. Im Vergleich mit konventionellen Werkstoffen bieten Verbundwerkstoffe höhere spezifische Festigkeit und Steifigkeit bei geringerem Gewicht. Sie bieten zudem Vorteile bezüglich ihrer Korrosionseigenschaften gegenüber metallischen Werkstoffen und bezüglich eines höheren Ermüdungswiderstands bei einigen Verbundwerkstoffen, wie CFK-Lamellen und -Kabeln. Ein Beispiel für eine solche Anwendung ist die nachträgliche Verstärkung von Tragwerken mit CFK-Lamellen [1, 2], die auf den Träger geklebt werden. Potenzielle Anwendungen der CFK-Lamellen als Zugelemente in vorgespannten Tragwerken sind absehbar.

Die im unidirektionalen Zugversuch gemessene Zugfestigkeit ist ein wesentlicher Materialkennwert, der oft zur Materialcharakterisierung, Dimensionierung und Qualitätskontrolle der Produkte verwendet wird. Der Einsatz von Verbundwerkstoffen im Bau setzt die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften voraus. Dabei sind die Eigenschaften

unter Zugbelastung für die Dimensionierung maßgebend. Die höchsten Zugfestigkeiten werden für unidirektional faserverstärkte Verbundwerkstoffe parallel zur Faserrichtung erreicht.

Ein Hauptproblem bei der praktischen Anwendung von CFK-Zugbändern ist die Übertragung der Zugkräfte vom Rest der Struktur beziehungsweise des Tragwerks auf die CFK-Lamelle. Durch eine verschiebungskontrollierte Krafteinleitung am Ende der Lamelle wird ein ungleichmäßiges Zugfeld erzeugt. Unter Umständen könnte sich die potenzielle Spannungskonzentration als problematisch erweisen, das heißt eine unregelmäßige Zugspannungsverteilung könnte zum vorzeitigen Versagen des Zugelements führen. Dieses Phänomen wurde mehrfach bei Zugprüfungen an CFK-Lamellen im Labor festgestellt.

Darüber hinaus findet bei der Zugprüfung von unidirektionalen CFK-Lamellen mit dem normierten Verfahren [3] ein Teil der Brüche an der Einspannstelle der Probe statt. Bei der Auswertung der Prüfergebnisse wird ein solches Ergebnis als „ungültig“ betrachtet. Bei geklebten

CFK-Lamellen auf Tragwerken könnten infolge so genannter „Endeffekte“ solche Probleme ebenfalls auftreten.

Bei der Bestimmung der Materialkennwerte von unidirektional faserverstärkten Kunststoffen mit der konventionellen Prüfmethode stellt sich die Schwierigkeit der korrekten und möglichst reproduzierbaren Krafteinleitung. Einige Typen von Krafteinleitungen können zum vorzeitigen Versagen des Prüflings in der Nähe der Einspannung führen. Das ist in der Regel auf Spannungskonzentrationen und eine ungleichmäßige Spannungsverteilung zurückzuführen, welche zu einem Versagen des Prüflings vor dem Erreichen der Zugfestigkeit des Materials führen. Die mit derartigen Proben gewonnenen Messresultate entsprechen somit nicht den tatsächlichen Materialkennwerten.

Durch die Krafteinleitung soll ein möglichst gleichmäßiger Kraftfluss zwischen Prüfling und Prüfvorrichtung gewährleistet werden. Beim Übergang zwischen Prüfling und Prüfvorrichtung werden normalerweise die maßgebenden Unstetigkeiten in der Kraft- beziehungsweise

in der Spannungsverteilung entlang des Querschnitts des Prüfkörpers erwartet.

Es existieren mehrere Prüfnormen zur Bestimmung der Zugeigenschaften isotroper, orthotroper und anisotroper (geschichteter) Materialien beziehungsweise Verbundwerkstoffe mit unterschiedlichen Probengeometrien. Die entsprechenden Geometrien der Proben können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden: die Gruppe der so genannten

Bild 1. Steiferer Kern der Lamelle, realisiert durch eine Verlängerung der Fläche der Krafteinleitung entlang der Mittelachse der Probe (die übertragenen Kräfte werden gegen die Mittelachse der Probe verlagert, so dass die Probenränder entlastet werden können)

Schulterstab-Proben, das heißt Proben mit einer Schulter im Bereich der Probeneinspannung, sowie die Gruppe der so genannten Parallelstab-Proben, bei denen die Probengeometrie der eines Flachstabs entspricht.

Der Zweck der unterschiedlichen Probenformen ist es, mit möglichst geringem Aufwand in der Probenvorbereitung und der Versuchsdurchführung die charakteristischen Materialkennwerte des Probenmaterials reproduzierbar bestimmen zu können. Dies bedeutet unter anderem, dass zur Bestimmung der Zugfestigkeit die Probe innerhalb der Messstrecke und nicht im Bereich der Probeneinspannung versagen muss.

Im Folgenden wird das neue Verankerungsprinzip zunächst vorgestellt, um dann beispielhaft mit FEM-Simulationen überprüft zu werden, die die theoretischen Einflüsse einer modifizierten Einspanngeometrie auf die Spannungsverteilung im Probenquerschnitt in der Nähe der Einspannung zeigen. Anschließend werden entsprechende Zugprüfungen an CFK-Lamellen gezeigt.

Neues Verankerungsprinzip

Die präsentierten Arbeiten hatten zum Inhalt, ein geeignetes Verankerungssystem zu entwickeln, das Verbesserungen im Zugverhalten von verankerten CFK-Lamellen erbringt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden als Schweizer Patent unter Nr. 1999 1692/99 angemeldet.

Das Hauptkonzept der Entwicklung ist es, eine relativ gleichförmige Spannungsverteilung der Krafteinleitung am Ende des Zuelements zu erreichen. Die Idee basiert auf einer Krafteinleitung in die Zugprobe durch Variation der Spannbackengeometrie der Prüfmaschine. Eine Spannungskonzentration an den Ecken der Zugprobe kann somit in wegkontrollierten Zugversuchen vermieden werden. In Bild 1 ist eine schematische Darstellung des verwendeten Prinzips angegeben. Durch einen steiferen Kern der Lamelle, realisiert durch eine Verlängerung der Fläche der Krafteinleitung entlang der Mittelachse der Probe, werden die übertragenen Kräfte gegen die Mittelachse der Probe verlagert, so dass die Probenränder entlastet werden können.

Mit dieser Modifikation der Spannbacken der Prüfmaschine können nun die Spannungskonzentrationen an den Probenrändern vermieden und somit die Wahrscheinlichkeit des Probenversagens im Bereich der Einspannung stark reduziert werden. Die Vorrichtung kann mit unterschiedlicher Geometrie (zum Beispiel Kreiskontur, Parabelkontur) für Prüflinge mit unterschiedlicher Geometrie und Aufbau (zum Beispiel mit Endaufleimern) verwendet werden. Ein weiterer Vorteil dieser Einspannung ist die wesentlich einfachere Probenvorbereitung, da auf die Herstellung von Proben mit aufwändiger Geometrie verzichtet werden kann.

Die Einspannung erfolgte in einem ersten Schritt nach DIN EN 2561, um Vergleichswerte für die mechanischen Eigenschaften der Lamellen zu beschaffen. In einem zweiten Schritt wurden die mit Epoxidharz aufgeklebten GFK-Aufleimer mit einer neuen Geometrie modifiziert, um die Krafteinleitung zwischen Einspannbacken und Prüfkörper positiv zu beeinflussen.

Die Geometrie der Aufleimer wurde so weit modifiziert, bis eine optimale Auslegung erreicht wurde. Angestrebt wurde eine Reduzierung der Spannungskonzentrationen an der Einspannstelle, um die Randeffekte bei der Prüfung so weit wie möglich zu unterdrücken und ein vorzeitiges Versagen der Prüflinge in der Nähe der Einspannstelle zu vermeiden.

Finite-Elemente-Simulationen von Zuelementen

Um das Prinzip des neu konzipierten Verankerungssystems zu überprüfen, wur-

den einige vergleichende Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt. Der Zweck dieser Simulationen bestand darin, die Einflüsse einer modifizierten Einspanngeometrie auf die Spannungsverteilung im Probenquerschnitt in der Nähe der Einspannung theoretisch zu untersuchen. Als Beispiel werden die Einflüsse einer halbkreisförmigen Geometrie der Stirnseite der Einspannung auf die Spannungsverteilung im Probenquerschnitt gegenüber einer flachen Stirnseite verglichen.

Bei der FEM-Analyse wurden folgende Bedingungen angenommen:

Lastfall: vertikale Verschiebung $\Delta = 1,0$ mm, Randbedingungen: alle Verschiebungskomponenten gesperrt (vertikale Verschiebung am oberen Rand: 1 mm), Probenabmessungen: Länge $L = 200$ mm, Breite $b = 20$ mm, Dicke $t = 1,0$ mm, Materialkennwerte: Einspannung $E = 210\,000$ N/mm², $\nu = 0,30$; Zugprobe $E = 60\,000$ N/mm², $\nu = 0,35$, FE-Modell: 2-D-Elemente, Anzahl der Elemente $N = 8268$, FE-Analyse: linear elastisch, statisch, Analytische Lösung: Normalspannung in Probenlängsrichtung $\sigma_y = \Delta \cdot E/L = 300$ N/mm² Gewählte Variante der modifizierten Einspanngeometrie: Halbkreis, Radius $R = 10$ mm.

Bild 2. FE-Netz der gesamten Zugprobe (a) mit der modifizierten Einspanngeometrie (Halbkreis), der modifizierten Einspanngeometrie (b) und einer eingespannten Zugprobe mit Krafteinleitungssystem mit modifizierter Geometrie (c)

In Bild 2a ist das FE-Netz der Probe mit dem Krafteinleitungssystem mit modifizierter Geometrie dargestellt. Die Geometrie der Vorderkante der Einspannung entspricht der eines Halbkreises. Bild 2b zeigt eine Vergrößerung des FE-Netzes im Einspannbereich, während in Bild 2c ein Modell einer Zugprobe mit

Bild 3. Verteilung der Normalspannung σ_y in Probenlängsrichtung an der Einspannungsstelle (Einspannung oben) bei einer Zugprobe mit traditioneller Einspanngeometrie (flache Stirnseite)

Bild 4. Verteilung der Schubspannung τ_{xy} an der Einspannungsstelle (Einspannung oben) bei einer Zugprobe mit traditioneller Einspanngeometrie (flache Stirnseite)

Bild 5. Verteilung der Vergleichsspannung nach von Mises an der Einspannungsstelle (Einspannung oben) bei einer Zugprobe mit traditioneller Einspanngeometrie (flache Stirnseite)

modifiziertem Krafteinleitungssystem dargestellt ist.

In den folgenden Abbildungen sind die Resultate der FE-Modellierung des Einspannbereichs der Zugprobe unter Zugbelastung dargestellt. Die Bilder 3, 4 und 5 zeigen die Verteilung der Normalspannung, der Schubspannung und der Vergleichsspannung an der Einspannstelle bei traditioneller Krafteinleitungsgeometrie. Es ist zu erkennen, dass die maximalen Werte der Spannungen jeweils am Rand der Probe entstehen.

Der maximale Wert der Vergleichsspannung nach von Mises unmittelbar in der Nähe der Einspannung an den Probenecken ist circa 36% höher als der Wert der nominellen Zugspannung von 300 N/mm², welche in genügender Entfernung von der Einspannung entsteht, wo das Spannungsfeld eine konstante

Verteilung über dem ganzen Querschnitt besitzt.

Durch die Modifikation der Einspanngeometrie kann das Spannungsfeld in unmittelbarer Nähe der Krafteinleitung so beeinflusst werden, dass die Spannungsspitzen, welche im Randbereich der Probe entstehen, abgebaut beziehungsweise gegen die Mittelachse der Probe verschoben werden.

In den Bildern 6, 7 und 8 ist die Verteilung der Normalspannung, der Schubspannung und der Vergleichsspannung an der Einspannstelle bei modifizierter Krafteinleitungsgeometrie dargestellt. Es zeigt sich, dass die maximalen Werte der Spannungen jeweils in der Mittelachse der Probe entstehen.

Der maximale Wert der Vergleichsspannung nach von Mises entsteht auf der Mittelachse der Probe in der

Nähe der Vorderkante der Einspannung mit halbkreisförmiger Geometrie. Der Wert der maximalen Vergleichsspannung liegt circa 19% über dem Wert der nominellen Zugspannung von 300 N/mm², welche in genügender Entfernung von den Probenenden entsteht, wo das Spannungsfeld eine konstante Verteilung über dem ganzen Querschnitt besitzt.

Vergleichende Zugprüfungen

Materialprobe

Für die Untersuchungen der Zugeigenschaften wurden CFK-Lamellen verwendet. Das Material besteht aus UD-kohlefaserverstärkter Epoxid-Harz-Matrix. Der Fasertyp ist Toray T300. Nach Herstellerangaben besitzen die Kohlefasern folgende Eigenschaften: Zugfestigkeit

Bild 6. Verteilung der Normalspannung σ_y in Probenlängsrichtung an der Einspannungsstelle (Einspannung oben) bei einer Zugprobe mit einer Variante (Halbkreis) der vorgeschlagenen Einspanngeometrie

Bild 7. Verteilung der Schubspannung τ_{xy} an der Einspannungsstelle (Einspannung oben) bei einer Zugprobe mit einer Variante (Halbkreis) der vorgeschlagenen Einspanngeometrie. Dargestellt ist auch das FE-Netz

Bild 8. Verteilung der Vergleichsspannung nach von Mises an der Einspannungsstelle (Einspannung oben) bei einer Zugprobe mit einer Variante (Halbkreis) der vorgeschlagenen Einspanngeometrie. Dargestellt ist auch das FE-Netz

3530 MPa, Zug-E-Modul 230 MPa, Bruchdehnung 1,5%, Rohdichte 1,80 g/cm³.

Die Matrix besitzt eine Dichte von 1,17 g/cm³ und das Verbundmaterial einen Faservolumengehalt von 69,7%. Die CFK-Lamellen lagen in ihrem Ausgangszustand als Endlos-Lamellen mit einer Breite von circa 50 mm und einer Dicke von circa 1 mm vor.

Für die Variante mit aufgeklebten GFK-Aufleimern wurde der handelsübliche, langsam härtende Araldit®-Klebstoff verwendet. Die GFK-Aufleimer bestehen aus Epoxid-Harz mit einer Verstärkung aus E-Glasfaser-Gewebe und besitzen eine Dicke von circa 1 mm.

Verankerung bei der Zugprüfung

Um den Einfluss der Geometrie der

Bild 9. Schematische Darstellung der verwendeten Geometrievarianten für die Krafteinleitungssysteme. Die dargestellten Formen beziehen sich auf die Form der GFK-Aufleimer beziehungsweise auf die Form der Pressflächen der Stahlplatten. Das rechte Ende der Form (im Bild) zeigt in Richtung der freien Prüflänge der CFK-Lamellen

Einspannung auf die Zugeigenschaften und das Bruchverhalten der Prüflinge zu untersuchen, wurden grundsätzlich zwei unterschiedliche Krafteinleitungssysteme verwendet. Einerseits wurde das nach DIN EN 2561 (Ausgabe November 1995) standardisierte System mit GFK-Aufleimern, andererseits wurden Stahlplatten als Krafteinleitungselemente verwendet, damit auf eine Verklebung verzichtet werden konnte.

Für beide Systeme wurden dieselben Geometrievarianten der Einspannung gewählt, damit ständig vergleichende Versuche durchgeführt werden konnten. Die Geometrievarianten der Krafteinleitungssysteme bestehen aus einer Reihenfolge von Geometrien mit steigender Krümmung an der Vorderkante, das heißt der Kante auf der Seite der freien Prüflänge der CFK-Lamelle.

Die verwendeten Geometrievarianten sind in Bild 9 dargestellt. Die angegebenen Geometrien beziehen sich sowohl

Bild 10. Stahl-Einspannplatten (Einzelstücke) mit unterschiedlichen Geometrievarianten. Dargestellt sind die Teilstücke der Geometrien 2, 3, 3b, 4, 5, 6, 7 und 8 (von links nach rechts beziehungsweise von oben nach unten)

auf die Form der aufgeklebten GFK-Aufleimer als auch auf die Form der Pressfläche der Stahlplatten. Die Stahlplatten wurden so hergestellt, dass die aufgerauten Pressflächen der unterschiedlichen Varianten dieselbe Geometrie der GFK-Aufleimer der entsprechend gleichen Variante aufwiesen.

In Bild 10 sind Stahl-Einspannplatten (Teilstücke) mit unterschiedlichen Geometrien der Vorderkante, und zwar die Teilstücke der Geometrien 2, 3, 3b, 4, 5, 6, 7 und 8 dargestellt. Die Pressfläche ist als leicht aufgeraute Fläche zu erkennen. Links und rechts von den Pressflächen befinden sich Bohrungen zur Fixierung der Teilstücke mit den entsprechenden symmetrischen Gegenstücken.

Bild 11 zeigt die GFK-Aufleimer (Einzelstücke) mit unterschiedlichen Geometrien der Vorderkante. Dargestellt sind die Einzelstücke der Geometrien 1, 2, 4, 5 und 6. Die verwendeten CFK-Lamellen wurden für die Versuchsreihe auf eine Breite von 20 mm und eine Länge von 300 mm zugeschnitten. Für die Verwendung mit den Stahl-Einspann-

Bild 11. GFK-Aufleimer (Einzelstücke) mit unterschiedlichen Geometrievarianten. Dargestellt sind die Teilstücke der Geometrien 1, 2, 4, 5 und 6 (von links nach rechts)

platten wurden die zugeschnittenen CFK-Lamellen nicht weiter bearbeitet.

Für die Verwendung mit den aufgeklebten GFK-Aufleimern wurden die Oberflächen der CFK-Lamellen an bei-

den Enden und die zu klebenden Flächen der GFK-Aufleimer mit Schmirgelpapier leicht aufgeraut, damit eine optimale Klebung gewährleistet werden konnte.

Für die Zugversuche mit den Stahl-Einspannplatten wurden die Prüfserien mit unterschiedlichen Geometrien mit dem Buchstaben P vor der dazugehörigen Zahl der Geometrievariante bezeichnet. Für die Zugversuche mit den aufgeklebten GFK-Aufleimern wurde der Buchstabe A für die Prüfserien mit 20 mm breiten und der Buchstabe B für die Prüfserien mit 18 mm breiten CFK-Lamellen verwendet.

Ergebnisse der Zugversuche mit Krafteinleitungssystem aus Stahl-Einspannplatten

Aus Bild 12 sind die Mittelwerte der Zugfestigkeiten der CFK-Lamellen der Zugversuche mit unterschiedlichen Stahl-

Bild 12. Resultate der Zugversuche an CFK-Lamellen mit Krafteinleitungssystem aus Stahl-Einspannplatten. Angegeben sind die Mittelwerte der Zugfestigkeiten für die unterschiedlichen Geometrien

plattengeometrien ersichtlich. Die Mittelwerte sind aus einer Serie von fünf Einzelproben berechnet worden. Die Zugfestigkeit der Einzelproben wurde aus der Bruchkraft und der Querschnittsfläche jeder Probe berechnet.

Ergebnisse der Zugversuche mit Krafteinleitungssystem aus GFK-Aufleimer Die Mittelwerte der Zugfestigkeiten der CFK-Lamellen der Zugversuche mit unterschiedlichen GFK-Aufleimergeometrien sind in Bild 13 angegeben. Bei diesen Zugversuchen wurden CFK-Lamellen mit einer Breite von 20 mm verwendet. Die aufgeleimten GFK-Aufleimer wiesen ebenfalls eine Breite von 20 mm auf. Die dargestellten Mittelwerte sind aus einer Serie von fünf Einzelproben berechnet worden. Die Zugfestigkeit der Einzelproben wurde aus der

Bild 13. Resultate der Zugversuche an CFK-Lamellen mit dem Krafteinleitungssystem aus GFK-Plättchen (Breite der CFK-Lamellen = 20 mm). Angegeben sind die Mittelwerte der Zugfestigkeit für die unterschiedlichen Geometrien

Bruchkraft und der Querschnittsfläche jeder Probe berechnet.

Die Mittelwerte der Zugfestigkeit der CFK-Lamellen der Zugversuche mit unterschiedlichen GFK-Aufleimergeometrien zeigt Bild 14. Bei diesen Zugversuchen wurden CFK-Lamellen mit einer Breite von 18 mm verwendet. Die aufgeleimten GFK-Aufleimer besaßen eine Breite von 20 mm. Bei der Klebung wurde beachtet, dass die GFK-Aufleimer zentriert aufgeleimt wurden, nämlich mit einem Übermaß von 1 mm auf jeder Seite (Probenkante). Die Mittelwerte und die Zugfestigkeit der Einzelproben wurden wie zuvor ermittelt.

Ergebnisse der Zugversuche mit weiteren Krafteinleitungssystemen und -geometrien
Auf Grund der in den vorangehenden Abschnitten angegebenen Resultate

Bild 14. Resultate der Zugversuche an CFK-Lamellen mit dem Krafteinleitungssystem GFK-Aufleimer. Die Breite der CFK-Lamellen betrug 18 mm. Angegeben sind die Mittelwerte der Zugfestigkeit für die unterschiedlichen Geometrien

wurden zusätzliche Geometrievarianten sowohl für die Einspannplatten aus Stahl als auch für die aufgeleimten GFK-Aufleimer untersucht. Dazu gehören die

Geometrie 3b und die Geometrie 8, welche nachträglich für das Krafteinleitungssystem mit Stahlplatten verwendet wurden.

In Bild 15 sind die Ergebnisse der Zugversuche mit den weiteren Geometrien angegeben. Als Referenz sind auch die Resultate der Geometrie 1, also des Systems mit gerader Vorderkante, aufgeführt. Neben der Verwendung von weiteren Geometrien wurde auch der Einfluss einer nicht über der gesamten Pressfläche gleichmäßigen Pressung bei der Krafteinleitung mit Stahlplatten untersucht. Mit Stahlplatten der Geometrie 1 wurde nämlich der Einfluss einer ungleichmäßig verteilten Pressung durch Einlegen je einer Stahlfolie mit einer Dicke von 0,1 mm (Reihe S1b) bzw. einer

Bild 15. Resultate der Zugversuche an CFK-Lamellen mit dem Krafteinleitungssystem aus Stahl-Einspannplatten. Angegeben sind die Mittelwerte der Zugfestigkeit bei weiteren verwendeten Geometrien, nämlich Geometrie 3b und 8. Das Resultat der Zugversuche mit Geometrie 1 wird als Referenz angegeben

Dicke von 0,2 mm (Reihe S1c) und einer Breite von 10 mm zwischen jede Stahlplatte und der darauf drückenden Spannbacke untersucht.

Bei beiden Systeme S1b und S1c wurden die Stahlfolien jeweils an der zur freien Prüflänge entfernten Seite der Stahlplattenenden angebracht, damit die Pressung der Spannbacken an diesen Stellen höher als an dem gegenüberliegenden Ende ist.

Bild 16 zeigt schematisch die Position der Stahlfolie bei den Zugversuchen mit Stahl-Einspannplatten der Geometrievariante 1.

Im Diagramm 5 sind die Resultate der oben erwähnten Versuchsreihen angegeben. Als Referenz wird zusätzlich das Resultat der Zugversuche mit den Stahl-Einspannplatten der Geometrie 1 hinzugefügt.

Bild 16. Schematische Darstellung der Position der Stahlfolien bei den Zugversuchen mit Stahl-Einspannplatten der Geometrievariante P6. Die Position der Stahlfolien bei der Variante P6b ist rot, bei der Variante P6c blau angegeben

Zugversuche mit optimierten Krafteinleitungssystemen

Zusätzliche Versuchsreihen wurden sowohl für die Einspannplatten aus Stahl als auch in Kombination mit aufgeleimten GFK-Aufleimer durchgeführt. Weiter untersucht wurde die Geometrievariante Nr. 6. Davon wurden zwei weitere Verbesserungen entwickelt. Die Optimierung betrifft vor allem die dreidimensionale Form der Druckzone der Stahlplatten und die Beschaffenheit der Druckoberfläche der Einspannung.

Im Diagramm 6 sind die Resultate der Zugversuche mit den weiteren Geometrien angegeben. Als Referenz werden die Resultate der Geometrie 1, nämlich dem System mit gerader Vorderkante, angegeben.

Bruchverhalten der Proben

Bei den Zugversuchen sowohl mit Stahl-Einspannplatten als auch mit aufgeklebten GFK-Plättchen wurde allgemein ein Bruchverhalten beobachtet, das typisch für unidirektional faserverstärkte Kunststoffproben ist.

Bild 17. Resultate der Zugversuche an CFK-Lamellen mit dem Krafteinleitungssystem aus Stahl-Einspannplatten. Angegeben sind die Mittelwerte der Zugfestigkeit bei weiteren verwendeten Systemen. Die Resultate der Zugversuche mit Geometrie 1 und Geometrie 6 werden als Referenz angegeben

Bei sämtlichen Zugversuchen wurde beobachtet, dass die CFK-Lamellen eher zuerst an den Rändern entlang der ganzen Prüflänge durch Absplitterung von einzelnen Fasern bzw. Faserbündeln versagt haben.

Es wurde zusätzlich beobachtet, dass bei sämtlichen mit Stahlplatten geprüften CFK-Lamellen das Versagen der Lamelle teilweise durch Eindrücken der Vorderkante der Stahlplatte auf die Lamellenoberfläche ausgelöst wurde.

Bild 18. Resultate der Zugversuche an CFK-Lamellen mit dem Krafteinleitungssystem aus Stahl-Einspannplatten. Angegeben sind die Mittelwerte der Zugfestigkeit bei weiteren verwendeten Systemen der Geometrie 6. Die Geometrievarianten T6 bzw. TK6 und V6 bzw. VK6 entsprechen die 3D-optimierten Varianten. Die Varianten mit dem Buchstaben K entsprechen die Reihen mit kombinierter Einspannung Stahlplatte/GFK-Aufleimer. Als Referenz wird das Resultat der Zugversuche mit der Standardeinsparung A1 angegeben

Die ersten Zugversuche mit den Stahl-Einspannplatten als Krafteinleitung zeigten teilweise die gleichen bzw. leicht niedrigere Festigkeitswerte gegenüber denen mit GFK-Aufleimern der entsprechenden Geometrievarianten.

Die weiteren Zugversuche mit den optimierten Stahl-Einspannplatten zeigten dagegen leicht höhere Festigkeitswerte gegenüber dem Standard-Einspannsystem mit GFK-Aufleimern und flacher Vorderkante (Geometrievariante A1).

Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchung des Einflusses einer modifizierten Geometrie der Krafteinleitung sowohl mit Hilfe der FEM-Simulation als auch mit Hilfe von Laborversuchen hat vor allem gezeigt, welche Schwierigkeiten bei der Prüfung von unidirektional faserverstärkten Werkstoffen entstehen können. Die FEM-Simulation hat gezeigt, dass eine Verlagerung der entstehenden Spannungsspitzen gegen die Mittelachse der Probe

durch die Modifizierung der Geometrie und eine Reduzierung der Werte der Spannungsspitzen im Querschnitt möglich ist. Durch die Laborversuche wurde angestrebt, diese theoretischen Überlegungen in der Realität zu erkennen bzw. umzusetzen. Das wurde durch die Optimierung der weiter untersuchten Geometrie erreicht, nämlich bei der Geometrievariante 6.

Die Benützung von Stahlfolien bei den Varianten mit Stahlplatten als Abstandshalter hat gezeigt, dass eine leichte Entlastung der Vorderkante der Stahlplatte positive Auswirkungen auf das Bruchverhalten der CFK-Lamelle hat.

Bei den optimierten Einspannungssystemen ergaben die Varianten mit den Stahl-Einspannplatten als Verankerung jeweils niedrigere Werte als die entsprechenden Varianten mit Kombination von Stahlplatten und GFK-Aufleimern. Das ist höchstwahrscheinlich auf die eher ungleichmässige Krafteinleitung bei den Stahl-Einspannplatten zurückzuführen. Durch das Zusammendrücken der Lamelle in den Stahlplatten besteht kaum die Möglichkeit, Unebenheiten in der Plattenoberfläche, bedingt durch die für eine gute Haftung notwendige Rauigkeit, auszugleichen. Durch die GFK-Aufleimer und die Klebschicht ist dagegen ein Ausgleich dieser Unebenheiten noch möglich bzw. wahrscheinlicher als bei den Stahl-Einspannplatten.

Summary

Anchoring of CFRP tension elements. A new anchoring system for tension elements made of composites is presented in this contribution. The anchoring system reduces the chances for premature failure at the ends of the tension elements which might be caused by stress concentration. The system provides tensile force initiation at the end of the tension element, in order to procedure a uniform tensile stress field. In this respect, the results of the comparative tensile test on CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Plastic) laminates as well as finite-element simulations are addressed. Differently designed anchoring systems were tried out by tensile tests on CFRP laminates and compared to the standard anchoring system by experimental and theoretical investigations. Some of the new anchoring systems reveal improvements in comparison to the standard clamping device. The new anchoring system might be utilized to improve the tensile testing procedure for CFRP laminates, the improvement of force initiation at adhesively bonded external CFRP reinforcements as well as for the pre-loading of tension elements for cable-stayed bridges.

Schlussfolgerungen

Durch die vorgestellten Untersuchungen wurde es ermöglicht, das Verhalten von UD-kohlefaserverstärkter Lamine bei der Zugprüfung unter Einwirkung unterschiedlicher Krafteinleitungsgeometrien zu beobachten. Auf Grund der vorliegenden Resultate sind einige Schlussfolgerungen möglich.

Einerseits wurde beobachtet, dass die FEM-Simulation die Vermutung einer Verlagerung des Kraftflusses bei der Einspannung gegen die Mittelachse der Lamelle bzw. eine Entlastung der Lamellenränder bestätigt hat, und dies konnte durch die Laborversuchen teilweise reproduziert werden.

Die Verwendung von Stahlfolien an der Hinterkante der Stahleinspannung als Abstandshalter lieferte Hinweise, dass die Anwendung einer Krafteinleitung mit Gradienten-Kraftfluss, nämlich mit höherer Belastung an der Hinterkante und gleichmässig abnehmender Belastung in Richtung der Vorderkante zur Beseitigung der Spannungskonzentrationen an der Vorderkante selbst vorteilhaft sein kann.

Die weiteren Versuche mit den optimierten Varianten unter Verwendung von GFK-Aufleimern haben gezeigt, dass die Kombination der Systeme die besten Resultate erlaubt hat. Durch die GFK-Aufleimer wird sehr wahrscheinlich ei-

ne gleichmäßige Spannungsverteilung bei der Krafteinleitung noch weiter begünstigt und die Spannungskonzentrationen weiter abgebaut. Die GFK-Aufkleimer haben die trotz der Verbesserungen noch vorhandenen Unregelmäßigkeiten in der Oberflächenbeschaffenheit der Stahl-Einspannplatten weiter ausgeglichen.

Literatur

- 1 Meier, U.: Development of Composite Plate Bonding Technique for Repair of Concrete Structures. In: National Seminar on Advanced Composite Material Bridges, Arlington, Virginia, 5.-7. Mai 1997
- 2 Duering, M.: CFK-Lamellen im Bauwesen, Schweizer Ingenieur und Architekt 112 (1994), 26, 516-520
- 3 DIN EN 2561, Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe, Unidirektionale Lamine, Zugprüfung parallel zur Faserrichtung. Deutsche Fassung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995

Die Autoren dieses Beitrages

Professor Dr. Mehdi Farshad, Jahrgang 1942, studierte Bauingenieurwesen an der Universität Teheran sowie an der Columbia University und an der Stanford University, USA. Ab 1970 war er als Professor an der Universität Shiraz im Iran und als Gastprofessor an der University of Toronto, Kanada, tätig und an mehreren Forschungsprojekten beteiligt. Seit 1991 arbeitet er an der EMPA im Bereich Kunststoffe und Verbundstrukturen und leitet die Ingenieurgruppe der Abteilung Kunststoffe/Composites und gleichzeitig hält er an der ETH Vorlesungen über die Stabilität von Schalen und Verbundsystemen, Biomechanik und Finite-Elemente-Simulationen. 1996 verlieh ihm die ETH den Rang eines Titularprofessors.

Dipl.-Ing. Patrick Rossini, Jahrgang 1974, studierte an der ETH Zürich Maschinenbau und Verfahrenstechnik mit den Schwerpunkten Leichtbauweisen/Faserverbundbauweisen und Fluidodynamik. Im Rahmen seiner Diplomarbeit befasste er sich mit der Optimierung des Extrusions- und des Spritzgussprozesses zur Herstellung von menschlichen Hüftprothe-

sen aus kohlefaserverstärktem Thermoplast. Von 1998 bis 2000 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Abteilung Kunststoffe/Composites der EMPA Dübendorf beschäftigt.

Dipl.-Ing. Peter Flüeler, Jahrgang 1943, studierte an der ETH in Zürich bis 1969 Bauingenieurwesen und war zunächst als projektierender Ingenieur im Hoch- und Tiefbau beschäftigt. Ab 1972 war er an der EMPA Dübendorf als Prüf- und Forschungsingenieur im Bereich des Massivbaus tätig und entwickelte zusammen mit Dr. M. Ladner die Methode der geklebten Armierung. 1977 und 1992 nahm er Studienaufenthalte am Massachusetts Institute of Technology (MIT) im Bereich Kunststoffe/Composites wahr. Seit 1979 leitet er die Abteilung Kunststoffe/Composites an der EMPA und ist seit 1986 an der ETH in Zürich als nebenamtlicher Dozent für Kunststoffe und deren Anwendungen in der Architektur, im Bauingenieurbereich und in den Werkstoffwissenschaften tätig.

Tiede®

Ein Unternehmen im Aufbruch

Wir senden Ihnen gern die neuesten Unterlagen.

Tiede GmbH + Co · Rissprüfanlagen · Bahnhofstr. 94-98
D-73457 Essingen bei Aalen · Telefon (0 73 65) 81-0
Telefax (0 73 65) 81-449 · Internet www.tiede.de

Einfach Prüfen!

Kommt Ihnen das bekannt vor? Teure Maschinen mit Funktionen, die man nie braucht und nur nach einem zweiwöchigen Seminar bedienen kann?

Damit ist jetzt Schluss!

Mit der BasicLine haben wir für Sie ein System entwickelt, mit dem Sie kostengünstig und einfach prüfen können. Funktionsprüfungen an Bauteilen sind ebenso möglich wie einfache Materialprüfungen – Sie profitieren dabei natürlich von den gewohnt sicheren Ergebnissen der Zwick-Prüfgeräte. Und das schon nach nur einer Woche Lieferzeit!

Gern senden wir Ihnen auf Anfrage weiteres Informationsmaterial zu!

Zwick GmbH & Co.
August-Nagel-Straße 11 • D-89079 Ulm
Telefon 0 73 05 - 100 • Fax 0 73 05 - 102 00
info@zwick.de • www.zwick.de

Zwick / Roell

BasicLine - einfach prüfen!

Schäden in langfaserverstärkter Keramik C/C-SiC

Charakterisierung auf unterschiedlichen Skalen

Annett Udoh, Klaus Eberle,
Rodolfo Aoki, Steffen Lütze und
Karl Maile, Stuttgart

Mit dem Ziel unterschiedliche Befunde zerstörungsfreier Prüfverfahren mikroskopischen Beobachtungen zuzuordnen, werden Ergebnisse der Ultraschallmessung, der Schwingungsanalyse, der fotogrammetrischen Dehnungsmessung und mikrostrukturelle Untersuchungen vergleichend betrachtet. Dabei werden die Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung der Methoden erklärt sowie deren Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 381 der Deutschen Forschungsgemeinschaft bildet die Verknüpfung von tatsächlichem Schädigungsbefund und physikalischen Erklärungen die Grundlage für die Modellierung von Schädigungsentwicklungen und ZfP-Befunden.

Der Einsatz von faserverstärkten keramischen Matrixwerkstoffen hat nicht nur in der Raumfahrt bei extrem thermisch belasteten Strukturen wie der Nasenkappe des X38, sondern auch für terrestrische Anwendungen als Frikationswerkstoff in Bremssystemen und Komponenten für Hochtemperaturwär-

Lebensdauervorhersage von Ceramic Matrix Composite (CMC) Bauteilen voraussetzt.

Bei dem im DLR-Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung entwickelten dreistufigen Liquid Silicon Infiltration Prozess (LSI) zur Herstellung von C/C-SiC-Faserkeramiken wer-

stand wird als carbonfaserverstärktes Carbon (C/C) bezeichnet und ist durch eine relativ hohe Porosität von rund 20% charakterisiert. Während des abschließenden Silizievorganges wirken die Kanäle als Kapillaren und ermöglichen ein schnelles Einströmen des flüssigen Siliziums ($> 1450^{\circ}\text{C}$). Die gleichzeitig beginnende Reaktion zwischen dem Kohlenstoff an den Kanalwänden und der Siliziumschmelze führt zu einer bündelweisen Umhüllung der Carbonfasern mit Siliziumkarbid und damit zu einem diskreten Oxidationsschutz innerhalb des Werkstoffgefüges. Jeder der drei Fertigungsschritte birgt charakteristische Fehlermöglichkeiten, die letztendlich die Qualität und Tragfähigkeit des fertigen Bauteils beeinflussen.

Die in dieser Arbeit untersuchten Proben wurden aus C/C-SiC-Platten (300 x 300 x 4,3 mm) mit $0^{\circ}/90^{\circ}$ 2-D-Gewebe- lage und mit HTA Kohlefasern und Phenolharz JK60 Prepreg hergestellt.

Bild 1. Belastung der gelochten Zugprobe

metauscher sehr zugenommen. Daraus ergibt sich die dringende Notwendigkeit einer zuverlässigen und ökonomischen Qualitätskontrolle, die das grundlegende Verständnis über die Versagensmechanismen und deren Einflüsse auf die

den kohlenstoffreiche Polymer-Precursoren verwendet [1], [2]. Nach dem Entformen der CFK-Bauteile erfolgt im Pyrolyseofen unter Luftabschluss die Umwandlung der Polymermatrix in eine Kohlenstoffmatrix. Dieser Materialzu-

Methoden

Die Untersuchungen des Schädigungsverhaltens erfolgten an streifenförmigen Proben mit den Abmessungen 100 x 20 x 4,3 mm (Bild 1), wobei Rissmusteruntersuchungen nur an der Probe 15 durchgeführt wurden.