

BESTIMMUNG DER SCHUBEIGENSCHAFTEN VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN MITTELS EINES SCHUBBRAHMENS

R. Basan, V. Trappe, F. Grasse

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Zusammenfassung

Die Bestimmung der Schubeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen ist für die Auslegung von Bauteilen aus diesen Materialien unerlässlich. Stand der Forschung sind dafür Zugversuche an diagonal verstärkten Flachproben, Experimente an Rohrproben oder aber auch querkraftbelastete Probekörper. Folgend wird mit dem Schubrahmen ein alternatives Prüfverfahren vorgestellt, das im Probekörper einen reinen Schubspannungszustand generiert und somit eine exakte Untersuchung der intralaminaren Schubeigenschaften ermöglicht. Dabei zeichnet sich der Schubrahmen gegenüber den genannten Prüfmethoden hinsichtlich der Ergebnisqualität und der Flexibilität aus.

Der an der BAM entwickelte Schubrahmen wurde speziell für Festigkeitsuntersuchungen konzipiert und ermöglicht Schubflüsse von ca. 950 N/mm, wobei sich im Probekörper ein homogener und einachsiger Schubspannungszustand einstellt. Die Klemmung der Proben erfolgt mit hydraulischen Spannzylindern, die eine Kontraktion der Probe während des Versuchs in Dickenrichtung ausgleichen. Der geteilte Aufbau des Schubrahmens ermöglicht die Prüfung von Probekörpern mit in einem weiten Bereich variierenden Wandstärken, so dass auch Sandwichkonstruktionen untersucht werden können.

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse zu Untersuchungen des Einflusses der Nachbarschichten auf das Materialverhalten vorgestellt. Ausgehend von der Analyse unidirektional verstärkter Lamine wurden Gelege mit 0°/90°-Orientierung der Fasern sowie Gewebe im Schubrahmen geprüft und die Ergebnisse miteinander verglichen.

1. MOTIVATION

Faserverbundwerkstoffe (FVW) zeichnen sich aufgrund ihres orthotropen Charakters durch ein komplexes Materialgesetz aus. Im Gegensatz zu isotropen Werkstoffen, bei denen zahlreiche Erkenntnisse bereits durch einen einfachen Zugversuch gewonnen werden können, sind zur Modellierung der mechanischen Struktureigenschaften einer unidirektionalen Einzelschicht Steifigkeiten und Festigkeiten in den einzelnen Richtungen des Laminats notwendig. Während die linearelastische Analyse von FVW nach der Klassischen Laminattheorie (KLT, [1]) erfolgt, werden für die Festigkeitsvorhersagen Bruchkörper definiert.

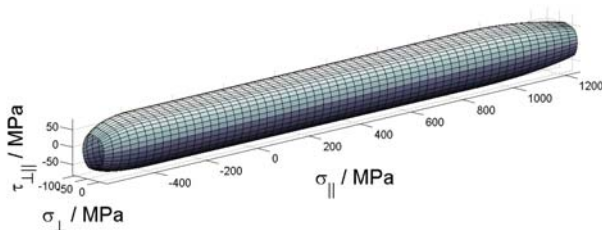


BILD 1. Bruchkörper der unidirektionalen Einzelschicht nach Puck [2] für CFK (HTS-Gelege, L285 / H287, Faservolumengehalt ≈ 50 %)

Zur Beschreibung der Werkstoffgrenzen der unidirektionalen Einzelschicht, z. B. mit dem Versagenskriterium nach Puck, ist die Kenntnis der faserverparallelen und senkrech-

ten Festigkeiten sowie der Schubfestigkeit erforderlich. Insbesondere die Ermittlung der Materialeigenschaften auf Schub belasteter Lamine ist nicht trivial, sondern erfordert einen erhöhten messtechnischen Aufwand. Die Schubbelastung stellt sowohl bei unidirektionalen als auch bei mehrachsig verstärkten Faserverbundstrukturen eine dimensionierende Zwischenfaserbruchbeanspruchung dar. Die Ermittlung entsprechender Kennwerte ist somit für die Auslegung von Bauteilen unerlässlich. Wenngleich stets die Einzelschicht den Ausgangspunkt der Analyse darstellt, ist doch zu berücksichtigen, dass sich benachbarte Schichten auf die Eigenschaften der einzelnen Lage auswirken. Von großem Interesse sind daher stets auch die Wechselwirkung benachbarter Schichten untereinander und deren Einflüsse auf das intralaminare Verhalten der einzelnen Lage.

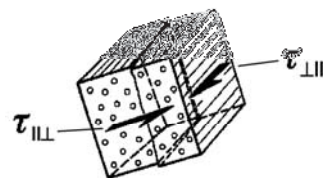


BILD 2. Schubbeanspruchung in der unidirektionalen Einzelschicht (nach [2])

Die Qualität der Messmethode zur Erlangung von Kennwerten ist besonders wichtig, um verlässliche Einschätzungen des Tragverhaltens von FVW treffen zu können. Nur durch die genaue Kenntnis der Materialeigenschaften der FVW kann das gesamte Potenzial dieser Werkstoffe

auch tatsächlich in Konstruktionen wiedergefunden werden. Dabei kommt der Optimierung der Bauteile auf Zwischenfaserbruch im Hinblick auf die Betriebsfestigkeit eine noch größere Bedeutung zu als den globalen Festigkeiten [3, 4].

2. HERKÖMMLICHE PRÜFVERFAHREN ZUR SCHUBKENNWERTBESTIMMUNG

2.1. DIN EN ISO 14129

Nach DIN EN ISO 14129 werden Schubkennwerte in einachsigen Zugversuchen an Flachproben mit einer Faserorientierung von $\pm 45^\circ$ zur Lastrichtung gewonnen [5]. Die gemessene Längskraft kann dabei mittels des Probenquerschnitts und auf der Grundlage der KLT einfach in eine Schubspannung überführt werden. Das Messen der Gleitung wird durch die Applikation von je einem längs und quer zur Lastrichtung verlaufenden Dehnungsmessstreifen ermöglicht.

Der Vorteil dieses Versuchs liegt in der geringen Komplexität der Probenvorbereitung und der Versuchsdurchführung. Allerdings sind die mittels dieses Verfahrens gewonnenen Materialkennwerte von geringerer Qualität. Generell liegen in den einzelnen Schichten des symmetrisch und ausgeglichen aufzubauenden Probekörpers nicht nur Schubspannungen, sondern auch faserparallele und senkrecht zu den Fasern verlaufende Spannungen vor. Insbesondere die fasersenkrechten Belastungen sorgen aber für eine zusätzliche Zwischenfaserbruchbeanspruchung, in dessen Folge die Schubfestigkeit zu gering abgeschätzt wird. Dieser Effekt wird mit abnehmendem Orthotropiegrad der Einzelschicht verstärkt, da die Querkzugspannungen im Verhältnis zu den Schubspannungen zunehmen.

Aufgrund der in diesem Versuch realisierbaren großen Verformungen bis zum Materialversagen einiger Faserverbundwerkstoffe mit Epoxidharzmatrix tritt ferner eine Faserrotation in Lastrichtung auf. Der Laminataufbau ändert sich somit während des Versuchs, so dass das Verhältnis der Einzelschichtspannungen zueinander variiert und die Auswertung auf der Basis der KLT fehlerbehaftet ist bzw. iterativ für kleine Lastschritte durchgeführt werden muss.

Insbesondere in Ermüdungsexperimenten kommt ferner dem freien Probenrand eine besondere Bedeutung zu, da sich dort Risse und Schädigungen des Laminats bilden, die wiederum zu einem vorzeitigen Probenversagen führen.

2.2. Rohrproben

An Rohrproben können auf verschiedene Arten Schubkennwerte ermittelt werden. Zum einen besteht die Möglichkeit, die Fasern $\pm 45^\circ$ zur Lastrichtung (Zug-/Drucklast) in Anlehnung an die Flachproben zu orientieren. Die Nachteile des mehrachsigen Spannungszustands in der Einzelschicht sind dann aber auch bei dieser Probe vorhanden. Das Verhältnis von freien Rändern zu Probenvolumen ist allerdings kleiner, so dass der Einfluss der endenden Fasern geringer als bei Flachproben ist.

Zum anderen werden Rohrproben hauptsächlich für Torsionsversuche verwendet und damit ein Schubspannungszustand in der Einzelschicht generiert. Durch die Anordnung der Fasern in 0° - und / oder 90° -Orientierung zur Probenlängsachse wird durch das Aufbringen eines Torsionsmomentes reiner Schub in der Einzelschicht

erzeugt.

Nachteilig ist hierbei der Schubspannungsgradient über der Probendicke durch den variierenden Abstand der einzelnen Schichten von der Torsionsachse. Infolgedessen treten ferner zusätzliche Spannungen zwischen den einzelnen Lagen durch das unterschiedliche Querkontraktionsverhalten benachbarter Schichten auf. Es gilt somit bei der Auslegung des Probekörpers die gegensätzlichen Anforderungen von Stabilität und der möglichst geringen Wandstärke für reine Spannungszustände zu berücksichtigen [6].

Die Fertigung von Rohrproben ist außerdem im Vergleich zu Flachproben aufwendig. Eine Lösung bietet hierbei die Wickeltechnologie. Jedoch ist damit ein Vergleich verschiedener Faserhalbzeuge nur schwer möglich, so dass andere Fertigungsverfahren zum Tragen kommen. Für große Flächengewichte um die 1.000 g/m^2 , z. B. mit Anwendung in Rotorblättern von Windkraftanlagen, sind typische Rohrdurchmesser zwischen 30 mm und 40 mm kaum noch realisierbar – die Komplexität des Verfahrens nimmt daher weiter zu.

2.3. Sonstige Prüfverfahren

Neben den vorgestellten etablierten Versuchen zur Ermittlung von Schubkennwerten stehen mit dem Off-Axis-Test an Proben mit einer Orientierung von 10° , dem Iosipescu-Versuch und der in der ASTM 7078 beschriebenen Prüfmethode weitere Verfahren zur Gewinnung von Schubkennwerten zur Verfügung.

Im Off-Axis-Test wird versucht, den entscheidenden Nachteil der Flachprobe mit den hohen Lasten in Querrichtung für Materialien mit einem geringen Orthotropiegrad zu reduzieren. Durch die Orientierung der Fasern in Lastrichtung nimmt das Verhältnis von Querkzug- und Schubspannung im Vergleich zur Normflachprobe und damit auch deren störender Einfluss auf die Messung der Schubeigenschaften ab. Die Ermittlung der Schubspannungen an sich ist dann aber nur bei Kenntnis der übrigen Materialeigenschaften (paralleler, senkrechter E-Modul und entsprechende Festigkeiten, Querkontraktionszahl) mittels der KLT möglich. D. h. aber auch, dass sich weitere Unsicherheiten in Form zusätzlicher Messungen oder Modellannahmen auf die Qualität der Versuchsergebnisse auswirken.

Die Methode nach Iosipescu beruht auf der Erzeugung der Schubspannungen durch die punktsymmetrische Vierpunktbiegebelastung einer Probe [7, 8]. Die dabei auftretende Querkraft sorgt in der Probenmitte für einen parabolischen Verlauf der Schubspannungen über der Probenhöhe. Insbesondere der Kerbe der Probe kommt eine bedeutende Rolle mit großen Auswirkungen auf die tatsächlich gemessenen Schubkennwerte zu.

Die Schubspannungen im Probekörper nach der ASTM D 7078 werden ebenfalls durch eine Querkraft erzeugt [9]. Damit einhergehend ist ein parabolischer Schubspannungsverlauf in der Probenmitte zu verzeichnen, der dem im Iosipescu-Versuch entspricht, wobei auch wieder ein deutlicher Einfluss von der Gestaltung der Kerbe zu erwarten ist. Die flächige Klemmung der Proben ermöglicht allerdings größere Lasten als beim Iosipescu-Versuch.

3. BESTIMMUNG DER SCHUBEIGENSCHAFTEN MITTELS EINES SCHUBRAHMENS

3.1. Wirkungsprinzip eines Schubrahmens

Mit Hilfe eines Schubrahmens ist es möglich, einfach zu fertigende Faserverbundproben in herkömmlichen Längskraftprüfmaschinen zu untersuchen und somit die Anforderungen sowohl an den Probekörper als auch an die Prüfmaschine gering zu halten.

Mittels des Schubrahmens wird einer Probe ein rautenförmiger Verformungszustand aufgeprägt, so dass im Inneren des Prüfkörpers ein reiner und homogener Schubspannungszustand erzeugt wird. Da die Lasten in der Ebene der Flachprobe eingeleitet werden, treten keine Spannungsgradienten in Dickenrichtung der Probe auf.

Der Schubrahmen besteht aus einem Ober- und einem Unterteil, zwischen denen der Prüfkörper mit Hydraulikzylindern fixiert wird. Die Kinematik der Rahmenteile ist über Gelenke derart vorgegeben, dass sich die Rahmenteile und somit auch der darin gespannte Prüfkörper ausschließlich rautenförmig verformen können.

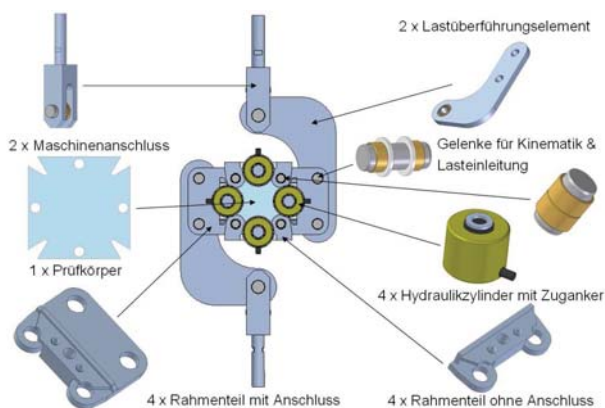


BILD 3. Schubrahmen mit den einzelnen Komponenten und dem Prüfkörper

Die Abmessungen des Probekörpers betragen $165 \times 165 \text{ mm}^2$, wobei die freie Probengröße $105 \times 105 \text{ mm}^2$ aufweist. Ein jeweils 30 mm breiter Streifen wird zum Spannen der Probe genutzt. Die Radien in den Ecken des Prüflings betragen 3,3 mm. Zusätzlich sind vier Bohrungen zur Durchführung der Zuganker für die Einspannung mit einem Durchmesser von 17 mm eingebracht. Die Geometrie wird vollständig von einer CNC-Fräse erstellt. Die Abweichungen einzelner Proben voneinander sind dadurch gering, und insbesondere die Radien in den Ecken als Orte lokaler Spannungskonzentrationen weisen eine sehr glatte Oberfläche auf, so dass zusätzliche Kerbwirkungen reduziert werden.

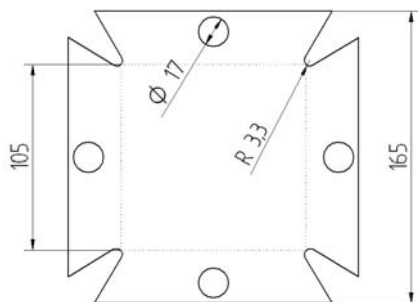


BILD 4. Geometrie des Probekörpers

Der maximale Verformungswinkel des Schubrahmens beträgt $13,8^\circ$, was einer Gleitung von ca. 24% entspricht. Die maximal zulässige Maschinenkraft liegt bei $\pm 100 \text{ kN}$, so dass ca. 950 N/mm Schubfluss zur Verfügung stehen. Die Probendicke ist durch den geteilten Aufbau des Schubrahmens in einem weiten Bereich variabel, was insbesondere auch für Sandwichkonstruktionen notwendig ist. Die maximale Spannkraft liegt bei viermal 120 kN , was einer mittleren Klemmspannung von rund 38 MPa entspricht.

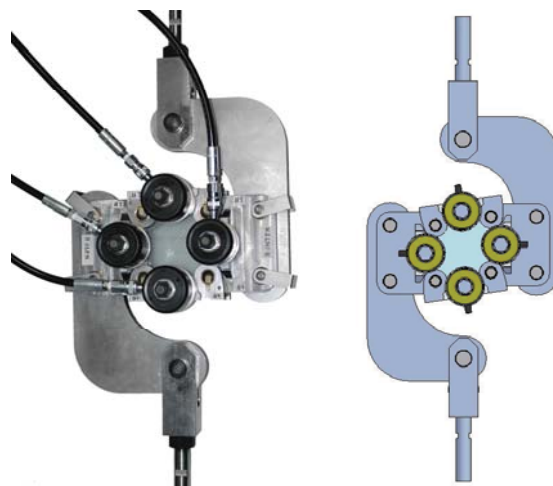


BILD 5. Schubrahmen mit Hydraulikschläuchen und GFK-Probekörper sowie CAD-Modell des verformten Schubrahmens

Die Probenfertigung erfolgt an der BAM im Resin-Transfer-Moulding-Verfahren. Dabei werden $500 \times 500 \text{ mm}^2$ große Platten hergestellt, aus denen anschließend die Proben für Schubuntersuchungen entnommen werden. Verschnittminimal können dabei neun quadratische Versuchsstücke mit Kantenlängen von 165 mm gewonnen werden.

3.2. Auslegung eines Schubrahmens

Die Auslegung des Schubrahmens erfolgte hinsichtlich der Punkte Festigkeit, Steifigkeit und Stabilität. Die einzelnen Bereiche wurden dabei iterativ durchlaufen bis in jedem die jeweiligen Anforderungen und weitere Randbedingungen (Fertigungsmöglichkeiten, Kosten, Probenfertigung) erfüllt wurden.

3.2.1. Steifigkeit

Um eine homogene Schubspannungsverteilung im Probekörper sicherstellen zu können, ist eine gleichmäßige Einklemmung notwendig. Das Spannprinzip mit jeweils einem in der Mitte der Rahmenteile befindlichen Hydraulikzylinder ist aber nur dazu geeignet, wenn die Rahmenteile eine möglichst hohe (Biege-) Steifigkeit aufweisen. Andernfalls deformieren sich die Rahmenteile geringfügig und die Klemmkraft der Spannzylinder kann nicht bis in die äußeren Bereiche der Probe geleitet werden.

Eine Analyse der Druckspannungsverteilung im Probekörper mittels kontinuumsmechanischer Berechnungsverfahren gestaltet sich schwierig, so dass deren Bestimmung mit Hilfe der Finiten Elemente erfolgte (s. Abschnitt 4).

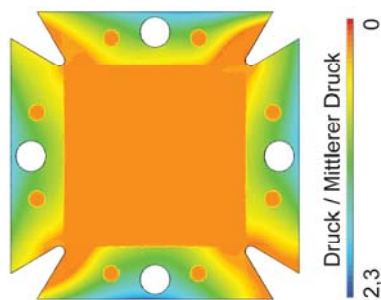


BILD 6. FE-Ergebnis der Klemmspannungen im Probekörper

BILD 6 verdeutlicht die Verteilung der Einklemmspannungen auf dem schubverformten Probekörper. Minimale Druckspannungen, d. h. die maximale Klemmung der Probekörper, werden im Randbereich auf Höhe der Spannzylinder erreicht. Sowohl in Richtung der Probenmitte als auch in Richtung der Seiten des Probekörpers nehmen die Klemmspannungen vom Betrag her ab, um schließlich in den Eckbereichen zu verschwinden. Der Gradient in Richtung der Plattenmitte ist positiv zu bewerten, da dadurch ein zu starkes Klemmen der Probe am Rand der Einspannung vermieden werden kann und somit die Gefahr eines Probenbruchs in diesem Bereich reduziert wird.

Die Verringerung der Klemmung in seitlicher Richtung ist mit dem gewählten Spannprinzip nicht zu verhindern. Lediglich die Stärke ihrer Abnahme kann durch eine massive und damit einhergehend steife Ausführung der Rahmenteile beeinflusst werden. Die maximale Überhöhung des Betrages der Klemmspannungen beträgt ca. 2,3. D. h. im Bereich der Zylinder wird etwas mehr als der doppelte Druck im Vergleich zum mittleren Druck realisiert. Der mittlere Druck beschreibt hierbei das Verhältnis von Zylinderspannkraft zu der Fläche der Einspannung der Probe im Rahmen.

Generell weist die Druckverteilung keine Symmetrielinien auf. Während der Aufbau des Schubrahmens symmetrisch zur den Mittellinien und die Schubverformung symmetrisch zu den Diagonalen ist, führt die Kombination beider Eigenschaften unter Berücksichtigung der nichtlinearen Haftreibungseffekte zwischen den Rahmenteilen und dem Schubrahmen zu einer unregelmäßigen Druckverteilung. Der Prüfkörper wird somit in jedem Rahmenteil anders gespannt.

3.2.2. Stabilität

Dünnwandige, schubbelastete Strukturen sind beulgefährdet. Da mit dem Schubrahmen Festigkeitsuntersuchungen durchgeführt werden sollen, ist ein instabiles Verhalten des Probekörpers zu vermeiden, d. h. die Beulspannung muss größer sein als die Festigkeit des Probekörpers. Nach [10] lässt sich die kritische Beulspannung nach der folgenden Gleichung bestimmen.

$$(1) \quad \tau_{krit} = k \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \sqrt[4]{B_x B_y^3}$$

Die Beulsteifigkeiten B sind aus der klassischen Laminattheorie für den jeweils vorliegenden Laminataufbau zu ermitteln, und die freie Plattengröße a ist durch die Geometrie des Schubrahmens vorgegeben. Der Beulwert k ist für eine gelenkig gelagerte, anisotrope Platte bekannt (s. BILD 7). Die Anpassung auf einen fest eingespannten

Probekörper erfolgt über den Vergleich der Beulwerte für eine isotrope schubbelastete Platte, bei der das Verhältnis zwischen fest eingespannt und gelenkig gelagert gerade rund 1,5 für eine quadratische Probenform beträgt. Die kritische Beulspannung ist demnach für eine fest eingespannte Schubprobe rund 50% größer als für eine Probe mit freier Verdrehmöglichkeit der Ränder.

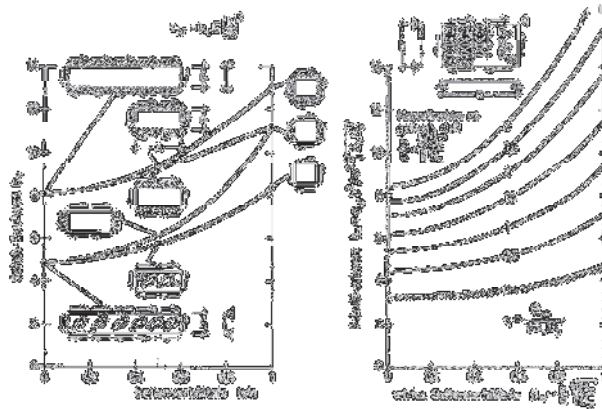


BILD 7. Schubbeulwerte für die isotrope sowie die orthotrope, gelenkig gelagerte Platte [10]

Übertragen auf den orthotropen Laminataufbau in der Schubprobe kann somit die kritische Beulspannung ermittelt werden. Eine Steuerung des Verhältnisses von Beul- und Bruchspannung geschieht über die Dicke der Probekörper. Zwar steigt die Festigkeit mit der Zunahme der Plattendicke, allerdings sind die Biegesteifigkeiten in höherer Ordnung proportional zu den Schichtdicken. Eine Vergrößerung der Plattendicke sorgt daher für eine Zunahme des Verhältnisses von Beulspannung zu Festigkeit.

Die Beulanalyse belegt eine beulfreie Schubprüfung von rund 1,3 mm starken CFK Proben mit einer 0°-Faserorientierung. Die Biegesteifigkeiten sind für GFK-Proben geringer. Dagegen sind die Schubfestigkeiten ähnlich denen von CFK, so dass die Beulsicherheit bei gleichen Probendicken geringer sein muss. Beulfrei getestet können deswegen Platten mit einer Mindestdicke von ca. 1,9 mm werden. Die Beulwerte von Laminaten mit 0°/90°-Aufbau weisen einen etwas geringen Beulwert auf als die Probekörper mit 0°-Ausrichtung der Fasern, so dass sich deren Mindestdicken zum beulfreien Testen noch etwas vergrößern.

Prinzipiell ist bei der Beulanalyse zu berücksichtigen, dass die Analytik von perfekten Eigenschaften der Probekörper und der Versuchsrandbedingungen ausgeht. Imperfektionen in Form von ungleichmäßigen lokalen Faser volumengehalten über der Plattendicke sowie ungleichmäßige Einspannungsbedingungen oder Vorkrümmungen der Proben und variierende Faserwinkel finden keinen Eingang in die Vorhersagen der analytischen Beulbetrachtungen. In der Realität haben sich Faktoren von 1,5 bis 2,0 in der Vergrößerung der Plattendicke bewährt, um sicherstellen zu können, dass die Probekörper Versagen bevor ein instabiles Verhalten eintritt.

3.2.3. Festigkeit

Festigkeitskritisch sind in der Konstruktion insbesondere die Lastenleitungselemente zur Überführung der Längskräfte aus der Maschine in den Schubrahmen sowie die einschnittig belasteten Bolzen in den Gelenken und die

Zuganker zum Spannen der Rahmenteile. Die übrigen Komponenten des Schubrahmens sind entweder nur zug-/druckbelastet und damit günstig hinsichtlich der Materialausnutzung oder sogar deutlich überdimensioniert wie im Fall der Rahmenteile, um die gewünschten Steifigkeiten in der Konstruktion zu erreichen.

Die Lasteinleitungselemente überführen die Maschinenkraft seitlich in den Schubrahmen. Daher werden diese Konstruktionselemente signifikant auf Biegung beansprucht. Die Bauhöhe ist dementsprechend groß. Spannungsmaxima wurden mittels der FEM ermittelt, und die Konstruktion den Ergebnissen entsprechend angepasst.

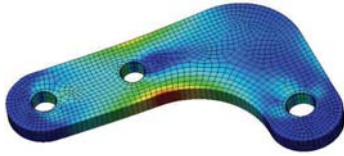


BILD 8. Qualitative Darstellung der Ergebnisse einer FE-Analyse der Vergleichsspannungen im Lastüberführungselement für Maximallast

Grundlage des Schubrahmens ist die gelenkige Lagerung der Rahmenteile zur Vorgabe der rautenförmigen Verformung des Prüfkörpers. Um diese Verformung realisieren zu können, sind ausschließlich die Bolzen dieser Gelenke für die Weiterleitung der Lasten in die benachbarten Rahmenteile verantwortlich. Die Anstrengungen sind in den Bolzen dieser Gelenke daher relativ hoch. Gleichzeitig dürfen die Bolzendurchmesser nicht zu groß gewählt werden, da ansonsten die Rahmenteile hinsichtlich ihrer Steifigkeitseigenschaften deutlich geschwächt würden und damit eine Verschlechterung der Verteilung der Klemmspannung auf dem Probekörper einherginge. Dieser Konflikt zwischen den unterschiedlichen Anforderungen macht die Bolzen zu hoch belasteten Strukturelementen. Die Auslegung einschnittig belasteter Bolzenverbindungen ist analytisch möglich. Zusammen mit der Wahl hochfester Werkstoffe kann ein verhältnismäßig geringer Bolzendurchmesser gewählt und trotzdem die Tragfähigkeit der Bolzen gesichert werden.

Die Verspannung der Rahmenteile mittels des Zugankerprinzips ermöglicht die optimale Materialausnutzung der ausschließlich zugbelasteten Strukturelemente. Bei den pro Spannzylinder zur Verfügung stehenden 120 kN ist die Auslegung eine Frage der geeigneten Materialfestigkeit.

4. FE-ANALYSE DER SCHUBSPANNUNGSVERTEILUNG IM PROBEKÖRPER

Die Analyse des Schubspannungszustands ist komplex und mit kontinuumsmechanischen Verfahren nicht durchführbar. Nichtlineare Effekte wie Reibung zwischen den Rahmenteilen und der Platte sowie große Verformungen sind mittels der FEM genauer abzubilden.

Daher wurden die für die Schubspannungen im Probekörper relevanten Komponenten der Konstruktion in der kommerziellen Software Ansys modelliert. Der Schubrahmen ist symmetrisch zur Mittelebene aufgebaut, so dass ein Halbmodell für die Untersuchungen ausreichend ist. Vier Rahmenteile sowie die mit einer erhöhten Rauigkeit versehenen Zwischenbleche zwischen dem Rahmen und dem Probekörper wurden ebenso modelliert wie die Druckverteilerelemente, an die die Hydraulikzylinder befestigt werden.

In feinerer Vernetzung ist der Probekörper nachgebildet worden.

Die Metallteile wurden isotrop mit typischen Materialeigenschaften von Stahl und Aluminium belegt. Für die Vernetzung des CAD-Modells sind Tetraederelemente mit quadratischen Ansatzfunktionen (SOLID187) zum Einsatz gekommen.

Von großer Bedeutung für die Schubspannungsverteilung im Prüfling ist die Klemmung der Probe im Rahmen. Eine sinnvolle Analyse dieser Eigenschaft ist möglich, wenn diese Kontakte prinzipiell auch offen sein können. Zu diesem Zweck werden zwischen Rahmen und Platte Kontakte mit einem Haftreibungskoeffizienten von 0,4 definiert. Auf eine Modellierung der Gelenkbolzen wurde verzichtet. Stattdessen wurden an den Drehpunkten der Gelenke Masterknoten definiert, auf die die Verschiebungsfreiheitsgrade der Randknoten der Bohrungen bezogen werden. Die Masterknoten wiederum können sich senkrecht zur Probe translatorisch verschieben und um die Gelenkachse rotieren. Die Ergebnisse in der nahen Umgebung der Gelenke sind zwar fehlerbehaftet. Jedoch sind diese Bereiche mit verschwindendem Einfluss auf die Spannungsverteilung im Probekörper. Die Gelenke an sich sind nicht festigkeitskritisch, so dass die Ungenauigkeiten zugunsten einer einfacheren Simulation des Schubrahmens gerechtfertigt sind.

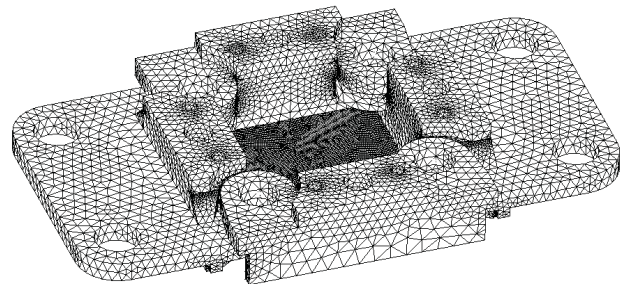


BILD 9. Netz des FE-Modells des Schubrahmens für Untersuchungen des Probekörpers

Der Probekörper selbst wird mittels geschichteter Solid-Elemente (SOLSH190) simuliert. Ein orthotropes Materialgesetz ist hinterlegt und wird für jeden einzelnen Layer durch Vorgabe einer Faserorientierung transformiert. Die Probe wird mit einem dem Experiment äquivalenten Druck gespannt. Die eigentliche Last wird über die Bohrungen in den Seitenteilen in Form von Verschiebungen aufgebracht, um die Konvergenz der nichtlinearen Rechnung sicherstellen zu können. Über die Reaktionskräfte an den verschiebungsbehinderten Knoten wird auf die dazugehörige Kraft geschlossen.

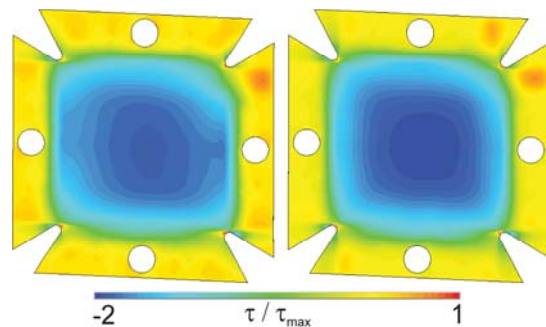


BILD 10. Schubspannungsverteilungen im Probekörper für 0°- und 0°/90°-Orientierung der Fasern bei gleicher Verformung des Schubrahmens

BILD 10 veranschaulicht die Schubspannungsverteilungen in den Probekörpern für ein unidirektional verstärktes Laminat und einen Versuchskörper mit 0°/90°-Orientierung bei gleicher Verformung der Rahmenteile. Generell sind ähnliche Verläufe der Schubspannungen zu beobachten. Ausgehend vom Rand der Rahmenteile, in denen der Probekörper fest eingespannt ist, nehmen die Beträge der Schubspannungen zu. Es existieren annähernd kreisförmige Bereiche gleicher Spannungsniveaus. Die Schubspannungsextrema liegen jeweils in der Mitte der Probe. Geringe Unterschiede zwischen beiden Faserorientierungen sind in den Ecken der Platten zu beobachten. Die Ecken der Proben weisen ebenfalls Spannungskonzentrationen auf. Jedoch sind deren Beträge geringer als die in der Probemitte, so dass ein Versagen der Probe dort zu erwarten ist.

5. UNTERSUCHUNGEN DER INTRALAMINAREN SCHUBEIGENSCHAFTEN VON CFK

Die Versuche zur Ermittlung von Schubkennwerten wurden in einer Längskraftprüfmaschine der Firma MTS mit einem Kraftbereich von ± 500 kN und einem maximalen Traversenweg von ± 125 mm durchgeführt. Die Gleitung wurde entweder über den Traversenweg der Prüfmaschine oder direkt mittels Dehnungsmessstreifen auf der Probe gemessen. Dazu werden die DMS in Diagonalrichtung appliziert. Die Gleitung ist dann gerade das Doppelte der gemessenen Dehnung.

$$(2) \quad \gamma_{\perp\parallel} = 2\varepsilon_{45^\circ}$$

Die Schubspannung wird bestimmt als Quotient der aufgebrachten Prüfmaschinenkraft und zum einen der Probendicke und zum anderen der freien Probenlänge von 105 mm.

$$(3) \quad \tau_{\perp\parallel} = \frac{1}{105 \text{ mm}} \frac{F}{t}$$

Untersucht wurden insgesamt 13 Proben – je fünf Versuchsstücke aus CFK-Gelege mit einer Faserorientierung von 0° sowie 0°/90° und drei Gewebeproben, die insgesamt eine sehr geringe Streuung aufwiesen, so dass die geringere Anzahl an Proben ausreichend war. Jede Probe wurde mit zwei Dehnungsmessstreifen versehen. Diese wurden zum einen genutzt, um die Gleitung zu bestimmen. Zum anderen wurde mit den DMS die Prüfung durchgeführt, ob ein Beulen der Lamine auftrat. Zusätzlich wurde bei den Proben, die ein Versagen der DMS aufgrund der großen Verzerrungen aufwiesen der Maschinenweg zur Gleitungsbestimmung herangezogen.

5.1. Schubkennwerte unidirektional verstärkter CF-Lamine

Die Versuchsergebnisse der unidirektional verstärkten Proben waren untereinander sehr ähnlich (s. BILD 11) und sind gekennzeichnet durch einen nichtlinearen Verlauf der Schubspannungs-Gleitungskurve mit mehreren deutlichen Kraftabfällen zwischen drei und fünf Prozent Gleitung, die auf ein faserparalleles Versagen der Proben zurückzuführen sind. Die typischen Positionen der Risse durch die gesamte Probenlänge waren die Einspannungen, deren Kante parallel zu den Fasern verläuft sowie die Probenmitte, ebenfalls entlang der Fasern. Die Brüche sind verhältnismäßig spröde.

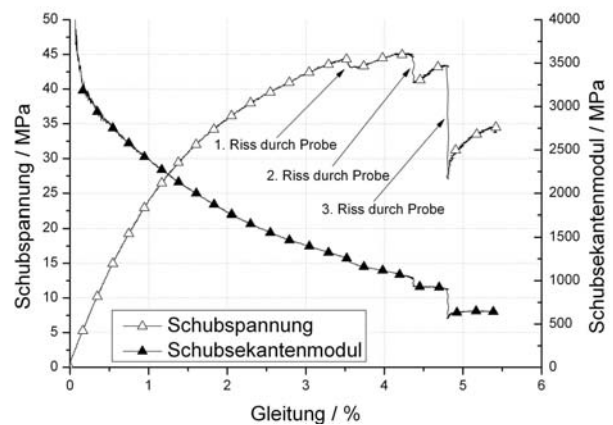


BILD 11. Schubspannungen und Schubsektantenmodul über der Gleitung für ein unidirektional verstärktes CF-Laminat

Als Festigkeitskriterium wird der erste deutliche Kraftabfall definiert. Infolge der veränderten Lastsituation durch den ersten Riss kann nicht mehr von einem reinen Schubspannungszustand ausgegangen werden.

Es wird deutlich, dass sich in unidirektional verstärkten Proben faserparallele Risse sehr schnell ausbreiten können und zu einer durchgehenden Schädigung des Laminats führen.

5.2. Einfluss der Nachbarschicht auf die Schubeigenschaften

Die gängigen Theorien zur elastischen Berechnung (KLT) bzw. zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens (Puck) von Faserverbundwerkstoffen berücksichtigen Einflüsse der Nachbarschicht nicht oder nur ungenügend. In vergleichenden Versuchen mit dem Schubrahmen konnten deutliche Auswirkungen eben dieser Nachbarschichten an Gelegen bzw. Geweben Kohlenstofffaser verstärkter Verbundwerkstoffe gemessen werden.

Die Experimente umfassten jeweils fünf Proben mit einer Faserorientierung von 0° und 0°/90° und drei Probekörper mit gewebten Fasern. Auch bei diesen Experimenten wurden die Dehnungen in den Diagonalen des Schubrahmens bestimmt.

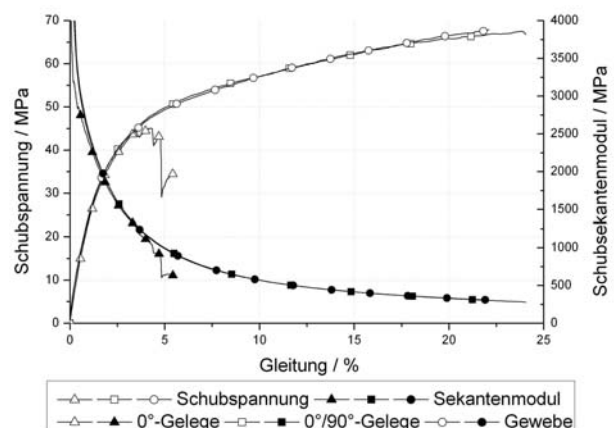


BILD 12. Schubspannungen und Schubsektantenmodul über der Gleitung für Proben mit verschiedenen Nachbarschichten

Das Schubspannungs-Gleitungsdiagramm (BILD 12) zeigt je eine Probe jeden Typs. Es sind zum einen die nahezu identischen Verläufe der Proben mit 0°/90°-Gelegen sowie mit Gewebe zu erkennen. Sowohl die Steifigkeiten als auch die maximal erreichten Spannungen sind fast identisch. Zum anderen wird aber auch der signifikant abweichende Verlauf des UD-Materials sichtbar, das sowohl in der Bruchgleitung als auch in der Festigkeit deutlich hinter den anderen Probentypen zurückbleibt. In BILD 14 ist deutlich die wesentlich größere plastische Verformung der 0°/90°-Probe im Vergleich mit der unidirektional verstärkten Probe zu erkennen.

Die Steifigkeit entspricht, wie auch aus der KLT zu erwarten ist, der der 0°/90°-Gelege- und damit auch der Gewebeprobe (BILD 13).

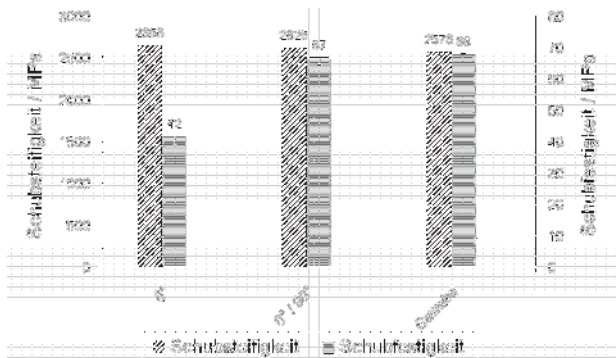


BILD 13. Schubkennwerte für CFK unter Berücksichtigung der Einflüsse der Nachbarschicht

Die Auswertung aller Proben hinsichtlich der Steifigkeit (nach DIN EN ISO 14129) und der Festigkeit lässt folgende Aussagen zu:

- Es gibt keinen messbaren Einfluss der Nachbarschicht auf die Schubsteifigkeit. Sowohl die unidirektional orientierten Gelege als auch das Kreuzlaminat und das Gewebe weisen im Rahmen der Streuung die gleichen Steifigkeiten auf.
- Die Festigkeiten der zweiachsig verstärkten Lamine sind untereinander fast gleich und mehr als 50% größer als die des UD-Geleges.

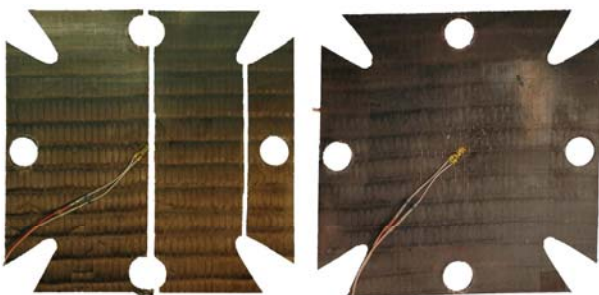


BILD 14. Unidirektional und 0°/90° verstärktes Laminat nach Schubbeanspruchung

Die Versuche belegen, dass sich Risse in unidirektional verstärkten Laminaten ungehindert entlang der Faserrichtung ausbreiten können (s. BILD 14). Kreuzlaminat dagegen weisen höhere Schubfestigkeiten auf. Eine Rissbildung in der Matrix infolge der Zwischenfaserbruchbeanspruchung wird durch die quer zum Riss liegenden Schichten gestoppt. Es treten somit zwar mehr Mikrorisse als in UD-Laminaten auf, allerdings sind deren Auswirkungen geringer. Der Verbund ist unempfindlicher gegen die Ausbreitung der Risse und erlangt somit höhere Festigkeiten.

Dabei ist es unerheblich, ob es sich um ein Gelege oder Gewebe handelt, jedoch ist zu berücksichtigen, dass ein Gelege mit 0°/90°-Verstärkung bei faserparalleler Beanspruchung und insbesondere bei Druckbelastung einem Gewebe aufgrund der geringeren Faserumlenkung weit überlegen ist.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Schubkennwertermittlung von Faserverbundwerkstoffen erfolgt aktuell hauptsächlich an Flach- und Rohrproben. Diese Prüfverfahren sind allerdings mit Nachteilen behaftet, da sie entweder ungenaue Erkenntnisse liefern oder in der Probenfertigung aufwendig sind.

Eine Alternative bei der Analyse von Faserverbundwerkstoffen stellt der Schubrahmen dar, der einen im Messquerschnitt quadratischen Probekörper rautenförmig verformt und damit einen reinen und homogenen Schubspannungszustand erzeugt. Durch die Verwendung von einfach zu fertigenden ebenen Probekörpern sind beliebige Faserhalbzüge prüfbar. Die Einspannung der Probe erfolgt mittels Hydraulikzylindern an allen Seiten, so dass keine sich negativ auswirkenden freien Probenränder vorhanden sind.

Die Auslegung des Schubrahmens erfolgte nach den Punkten Steifigkeit, Stabilität und Festigkeit. Im Ergebnis liegt somit eine Prüfvorrichtung vor, die bis 100 kN belastet werden kann und dabei ca. 950 N/mm an Schubfluss in eine Probe variabler Dicke einleiten kann. Die Analyse des Stabilitätsverhaltens von GFK oder CFK war dabei die Grundlage zur beulfreien Untersuchung der Schubeigenschaften. Die Analyse des Schubrahmens mittels der FEM lieferte Erkenntnisse über die Verteilung der Klemmspannungen der Probe und belegt darüber hinaus die homogenen und einachsigen Schubspannungsverläufe im Probekörper.

Erste Untersuchungen mit dem Schubrahmen an Kohlenstofffaser verstärkten Kunststoffen liefern Erkenntnisse über die Schubeigenschaften von UD-Laminaten und über den Einfluss von Nachbarschichten in Laminaten unter intralaminarer Schubbeanspruchung, die für eine sichere Bauteilauslegung wichtig sind. Bei gleichem Materialaufwand unterscheiden sich unidirektional verstärkte Kunststoffe von Kreuzlaminaten bei gleichen Steifigkeitseigenschaften erheblich in ihren Schubfestigkeiten. Eine Berücksichtigung dieser Einflüsse der Nachbarschichten erfolgt bislang weder bei der klassischen Laminattheorie noch in Versagenskriterien (z. B. nach Puck).

Der Schubrahmen ergänzt die Möglichkeiten zur Ermittlung von Kennwerten schubbeanspruchter Lamine. Mit Hilfe des Schubrahmens können somit wesentliche Lücken im Verständnis der mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen geschlossen werden.

SCHRIFTTUM

- [1] VDI 2013, Blatt 3: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund – Berechnungen, 2006
- [2] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1996
- [3] Trappe, V.; Hickmann, S.; Sturm, H.: Bestimmung des Zwischenfaserbruchversagens in textilverstärktem Glasfaserkunststoff mittels der Röntgenrefraktionsstereographie. In: MP Materials Testing 10 (2008), S. 615-622
- [4] Trappe, V.; Harbich, K.-W.: Intralaminar Fatigue Behaviour of Carbon Fibre Reinforced Plastics. In: In-

- ternational Journal of Fatigue 28 (2006), S. 1187-1196
- [5] DIN EN ISO 14129: Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs- / Schubverformungs-Kurve, des Schubmoduls in der Lagen-ebene. 1998
 - [6] Trappe, V.: Beschreibung des intralaminaren Ermüdungsverhaltens von CFK mit Hilfe innerer Zustandsvariablen. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 5, Nummer 646. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002
 - [7] Iosipescu, N.: New Accurate Procedure for Single Shear Testing of Metals. In: Journal of Materials 2 (1967), Nr. 3, S. 537-566
 - [8] Pierron, F. and Vautrin, A.: Measurement of the In-Plane Shear Strengths of Unidirectional Composites with the Iosipescu Test. In: Composites Science and Technology 57 (1998), Nr. 12, S. 1653-1660
 - [9] ASTM D 7078: Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method. 2005
 - [10] Wiedemann, J.: Leichtbau – Elemente und Konstruktion. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007