

# FASERPARALLELE DRUCKFESTIGKEIT VON CFK: VERBESSERUNGEN DURCH EINSATZ PULTRUDIERTER STÄBE

Dipl.-Ing. C. Möller, Prof. Dr.-Ing. H. Schürmann  
 Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, TU Darmstadt  
 Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt, Deutschland

## Zusammenfassung

Am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen (KLuB)* der *TU Darmstadt* wird derzeit in einem DFG-geförderten Vorhaben der Einsatz dünner, pultrudierter CFK-Stäbchen als Ersatz bisheriger monolithischer CFK-UD-Strukturen vertieft untersucht. Hintergrund dieser Substitution sind die hohen faserparallelen Druckfestigkeiten pultrudierter CFK-Stäbchen, die im Wesentlichen auf eine geringe Filament-Fehlorientierung zurückzuführen sind. Durchgeführte faserparallele Druckversuche an runden CFK-Einzelstäbchen in einem eigens modifizierten Prüfverfahren haben gezeigt, dass faserparallele Druckfestigkeiten bis zu dem Dreifachen zugelassener Festigkeiten der Allgemeinen Luftfahrt erreicht werden können. Die experimentellen Ergebnisse ergaben zudem bei abnehmendem Stabdurchmesser eine Zunahme der faserparallelen Druckfestigkeit, die sich mit einer geringeren Anzahl von Fehlstellen und einer geringeren Filament-Fehlorientierung dünnerer CFK-Stäbchen begründen lässt.

Für den Einsatz im Bauteil wurden verschiedene Strategien zum Verkleben der CFK-Stäbchen erprobt und experimentell durch Querzugversuche bewertet. Ebenfalls wurde der Auslauf einzelner Stäbe numerisch und experimentell untersucht, um später Querschnittsanpassungen ohne nennenswerten Festigkeitsverlust realisieren zu können. Die Ergebnisse zeigen hier wiederum Vorteile der kleineren Stabdurchmesser, denen jedoch der zunehmende Drapieraufwand gegenübersteht.

## 1. EINLEITUNG

Ein klassisches Bauteil aus dem Leichtflugzeugbau ist der auf Biegung belastete Tragflügelholm, der im einfachsten Fall als I-Träger konzipiert ist und im Betrieb einer Wechselbelastung unterliegt (Bild 1).

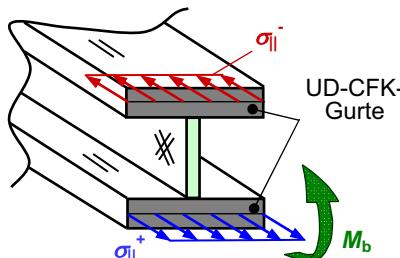


BILD 1: Hauptbelastungen in einem als Biegeträger konzipierten Flugzeugholm mit monolithischen UD-CFK-Gurten auf Ober- und Unterseite.

Nach derzeitigem Stand der Technik werden bei FKV-Konstruktionen die aus dem Biegemoment herrührenden Normalspannungen ( $\sigma_{\parallel}^+$  und  $\sigma_{\parallel}^-$ ) durch kompakte CFK-Gurte aufgenommen und so die hohen faserparallelen Steifigkeiten und Festigkeiten der Kohlenstofffaser genutzt. Ein Vergleich der für diesen Belastungsfall relevanten Zug- und Druckfestigkeiten zeigt, dass bei CFK die Längs-Druckfestigkeit  $R_{\parallel}^-$  stets unterhalb der Längs-Zugfestigkeit  $R_{\parallel}^+$  angesiedelt ist. Folglich kann bei auf Biegung beanspruchten Bauteilen die hervorragende Zugfestigkeit der Faser im Allgemeinen nicht ausgenutzt werden, da auf die

schwächere Druckfestigkeit dimensioniert werden muss. Zudem müssen je nach Halbzeugart und Fertigungsverfahren Festigkeitseinbußen für die faserparallele Druckfestigkeit  $R_{\parallel}^-$  von etwa 40 % (bei CFK-HT-Prepregs) und bis zu 70 % (bei einem CFK-HT-Handlaminat) gegenüber der von Faserherstellern angegebenen faserparallelen Zugfestigkeit  $R_{\parallel}^+$  hingenommen werden (Bild 2). Ursache dieses gravierenden Festigkeitsabfalls ist die im Bauteil reduzierte Laminatqualität, die im Regelfall unmittelbar vom Herstellungsverfahren abhängig ist.

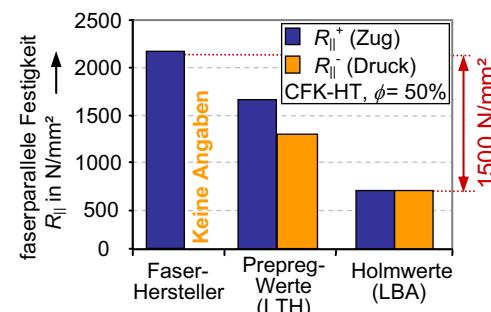


BILD 2: Faserparallele Festigkeiten im Vergleich: deutliche Abnahme der Angaben von Faserherstellern über Prepreg-Werte (LTH, [12]) bis hin zum Handlaminat (zulässige Holmwerte laut Luftfahrt-Bundesamt (LBA), [15]).

Im Hinblick auf Leichtbau und Kostenersparnis sind somit geeignete Maßnahmen erforderlich, die die Laminatqualität bei möglichst gleichbleibenden Herstellungsverfahren verbessern und eine

Steigerung der faserparallelen Festigkeiten – insbesondere der Druckfestigkeit  $R_{\parallel\parallel}$  – ermöglichen.

## 2. VERSAGENSMECHANISMUS UND WESENTLICHE EINFLUSSPARAMETER

Nach derzeitigem Wissensstand ist die Druckfestigkeit bei den am häufigsten eingesetzten und auf PAN basierten CFK-Fasern (HT- bzw. IM-Fasern) durch ein lokales Stabilitätsversagen (*Schubknicken*) der Fasern begrenzt [3], [11]. Dieses Stabilitätsversagen lässt sich schematisch durch das Schub-Knick-Modell nach Bild 3 erklären, bei dem die Fasern unter einer anfänglichen Fehlorientierung  $\phi_0$  betrachtet werden. Unter faserparalleler Druckbelastung wird das Momentengleichgewicht neben der Biegespannung innerhalb der Faser vor allem durch eine Schubspannung quer-längs zur Faserorientierung aufrecht erhalten. Gerade dieser für das Gleichgewicht so relevanten Schubspannung steht nur eine vergleichsweise geringe, da matrixdominierte Steifigkeit und Festigkeit gegenüber. Diese geringen Werte sind verantwortlich für das „frühzeitige“ faserparallele Druckversagen, können aber kaum verbessert werden. Der einzige verbleibende, aber wesentliche Parameter zur Beeinflussung dieses Stabilitätsversagens ist somit nach Bild 3 die anfängliche Faser-Fehlorientierung  $\phi_0$ , die im Hinblick auf eine hohe faserparallele Druckfestigkeit minimiert werden muss.

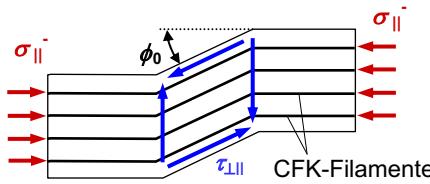


BILD 3: Einfaches Schub-Knick-Modell. Die unter einer anfänglichen Faser-Fehlorientierung  $\phi_0$  druckbelasteten Fasern müssen durch eine Quer-Längs-Schubspannung  $\tau_{\parallel\parallel}$  im Momentengleichgewicht gehalten werden [3], [5], [18].

Gelingt es, die Versagensform Schubknicken hinauszuzögern, so ist eine Steigerung der faserparallelen Druckfestigkeit bis hin zur wahren Werkstofffestigkeit der eingesetzten Faser zu erwarten, die nach [10] gleich oder sogar oberhalb der Zugfestigkeit zu vermuten ist.

## 3. VERBESSERUNGSANSATZ

Die effizienteste Maßnahme zur Unterdrückung des Schubknickens – und damit zur Steigerung der faserparallelen Druckfestigkeit – ist die Minimierung der Faserfehlorientierung  $\phi_0$  durch exakte Ausrichtung der einzelnen Filamente innerhalb der UD-Schicht [4], [13]. Eine minimale Faserfehlorientierung kann in einem Pultrusionsprozess erreicht und fixiert werden, bei dem neben der

Faserstreckung durch die Abzugskräfte vor allem die Richtwirkung einer Düse wirksam ist. Die damit verbundenen qualitativen Festigkeitssteigerungen, gerade bei kleinen und geometrisch einfachen Querschnitten, wie z.B. dem Rundstab, sind durchaus bekannt [6], [7].

Zentraler Verbesserungsansatz zur Erhöhung der faserparallelen Festigkeit im *Bauteil* ist damit die Substitution bisher monolithisch aufgebauter CFK-UD-Strukturen durch qualitativ hochwertig pultrudierte CFK-Stäbchen kleineren Querschnitts.

Die bereits ausgehärteten CFK-Stäbchen werden dazu als eine Art Halbzeug beim Laminierprozess in das Bauteil mit eingelegt bzw. zusammen mit den übrigen Halbzeugen infiltriert. Durch kleine Stabquerschnitte mit entsprechend geringer Biegesteifigkeit lassen sich die CFK-Stäbchen auch in leicht gekrümmten Strukturen drapieren, ohne dass nennenswerte Biegespannungen im Stab entstehen und ggf. den Festigkeitsgewinn aufzehren.

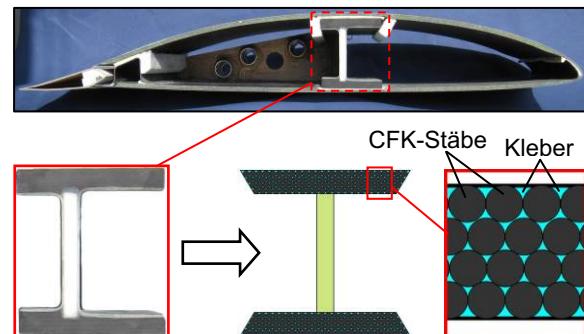


BILD 4: Exemplarisches Bauteil: Flügelholm mit CFK-Gurten aus dem Leichtflugzeugbau. Der bisher monolithisch aufgebaute CFK-Gurt (li) wird durch pultrudierte CFK Stäbchen substituiert (re).

Als exemplarisches Bauteil mit direktem Praxisbezug dient der Holm eines Leichtflugzeugs (Bild 4). Die Gurte dieses Holms werden nach derzeitigem Stand der Technik mit getränkten UD-Strängen von Hand monolithisch aufgebaut. Verfahrensbedingt ist eine optimale Filamentausrichtung mit Faserfehlorientierungen unter 1° praktisch gar nicht möglich, so dass nur die vergleichsweise geringen Holmfestigkeiten nach Bild 2 angesetzt werden können. Es wird erwartet, dass sich bei diesem Bauteil durch die Stäbchen-Technologie die erzielbare Druckfestigkeit in den Gurten verdoppeln oder gar verdreifachen wird.

### 3.1. Historie und derzeitige Anwendungen

Der Grundgedanke der Stäbchen-Technologie ist prinzipiell nicht neu und wird bereits in einigen Bereichen umgesetzt. Erste Untersuchungen zum Einsatz von pultrudierten CFK-Stäbchen gab es in den 90er Jahren in den USA. Vorrangig von *NASA*, *US Air Force* und den Firmen *Neptco* und *Bell Helicopter Textron Inc.* wurde speziell unter dem

Aspekt einer kostengünstigen Fertigung bei gleichzeitiger Festigkeitssteigerung der Einsatz von CFK-Stäbchen in Bauteilen untersucht und teilweise patentiert [16]. Veröffentlicht wurden aber nur wenige Ergebnisse [1], [2], die zudem keine Aussage bzw. Anhaltspunkte über die untersuchten Parameter liefern. Bekannt ist der industrielle Einsatz von runden CFK-Stäbchen zur Verstärkung von Hut-Profilen (Bild 5) [2] und als Gurtwerkstoff in Holmen des US-Segelflugzeugs *Genesis* [14], das Mitte der 90er Jahre in wenigen Exemplaren bei der litauischen Fa. *Sportine Aviacija* in Lizenz gebaut wurde. Aufgrund mangelnder Nachfrage musste zwar die *Genesis*-Produktion eingestellt werden, der Einsatz von pultrudierten CFK-Stäbchen in Holmgurten wird aber von der Fa. *Sportine Aviacija* weiterhin in ihren aktuellen Segelflugzeug-Typen LAK 18/19/20 umgesetzt.

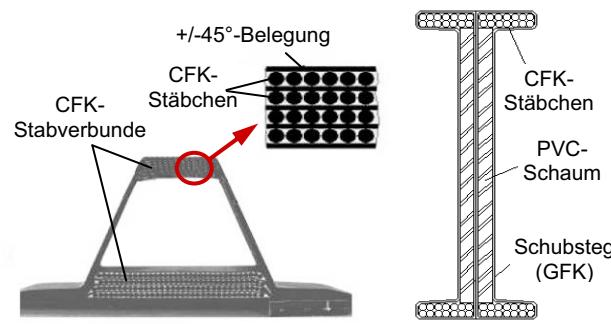


BILD 5: Bisheriger Einsatz von pultrudierten CFK-Stäben in FKV-Konstruktionen: Hut-Profile mit mehreren Lagen CFK-Stäbchen (li) [2] und CFK-Stäbchen im Holmgurt bei US-Experimental-Flugzeugen (re) [14].

Auch in Deutschland wurden im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms *LUFO 1* Untersuchungen zum Einsatz von pultrudierten CFK-Stäbchen als Gurtwerkstoff für Segelflugzeug-Holme durchgeführt. Im Vordergrund standen allerdings die praktische Umsetzung zum Verkleben der Stäbchen mittels eines Infusionsverfahrens und die Realisierung von abgestuften Gurtquerschnitten. Zum Einsatz kamen lediglich zugelieferte runde CFK-Stäbchen mit einem Durchmesser von 3,0 bzw. 3,2 mm der Firmen *Avia Sport*, *Neptco* und *Krempe*. Eine vertiefte Untersuchung der Stäbe selber fand nicht statt.

Zusätzlich zu dem industriellen Einsatz sind pultrudierte CFK-Stäbchen durch die praktikable und vergleichsweise einfache Weiterverarbeitung auch in der US „Homebuilder-Szene“ beim Bau von Experimental-Flugzeugen [14] zu finden.

Bei den derzeitigen Anwendungen kann davon ausgegangen werden, dass die Potenziale der Stäbchen-Technologie noch nicht vollständig genutzt werden. Zudem sind bei den spärlichen Veröffentlichungen nur unzureichende Angaben über die untersuchten Parameter erhältlich. Fundierte Aussagen über die erzielbaren Festigkeitsvorteile, als auch das praktische

Vorgehen zum Einsatz der CFK-Stäbchen im Bauteil fehlen. Sie werden in einem laufenden DFG-Vorhaben am Fachgebiet *KLuB* erarbeitet.

### 3.2. Eigenes Vorgehen

Für einen erfolgreichen und möglichst optimalen Einsatz der CFK-Stäbchen im Bauteil werden derzeit im Forschungsvorhaben drei Hauptaspekte bearbeitet und erste Ergebnisse daraus vorgestellt:

- Optimierung und Verbesserung der faserparallelen Druckfestigkeit des Einzelstabs
- Ausrichten, Anordnen und Verkleben der Stäbchen zum Stabverbund
- Gestaltung des Stabauslaufs von Einzelstäben zur kontinuierlichen Querschnittsanpassung

### 4. FASERPARALLELER DRUCKVERSUCH AM EINZELSTAB

Mit entscheidend für eine fundierte Aussage über die faserparallele Druckfestigkeit ist ein zuverlässiger Druckversuch, der sowohl einen möglichst homogenen und einachsigen Spannungszustand als auch ein Versagen im freien Bereich der Probe ermöglicht. Neben der Restriktion der Probenlänge durch die Knickgrenze kommt bei UD-Strukturen erschwerend hinzu, dass eine Lasteinleitung über Schub durch die niedrigen Steifigkeiten und Festigkeiten quer zur Faser begrenzt ist und zu einer Spannungsüberhöhung in den Randfasern führt (Bild 6, li). Zudem resultiert aus den erforderlichen Klemmkräften eine unerwünschte Biegeverformung der Fasern im Lasteinleitungsreich, die im Regelfall zu einem verfrühten Versagen der Probe führt. Die andere Variante einer ausschließlichen Lasteinleitung durch stirnseitigen Druck (Bild 6, re) hat wiederum den Nachteil, dass die Filamente im Aufstandsbereich schlechter gestützt werden. Durch diese im Grenzfall als gelenkige Lagerung anzunehmende Randbedingung wird das Schubknicken begünstigt und ggf. die erprüften Druckfestigkeiten verfälscht.

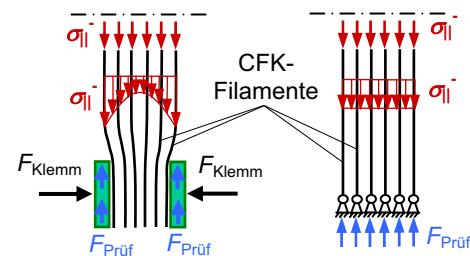


BILD 6: Prinzipien der Lasteinleitung beim faserparallelen Druckversuch: Seitlich über Schub (li) und stirnseitig über Druck (re).

Der faserparallele Druckversuch stellt bei FKV somit eine besondere Herausforderung dar, die bereits in

vielen Arbeiten diskutiert, aber immer noch nicht zu einer befriedigenden Lösung geführt hat [8], [17], [19].

Basierend auf den Erfahrungen und Veröffentlichungen anderer Autoren, wurde am Fachgebiet *KLuB* in Anlehnung an die Druck-Prüfvorrichtung des *Imperial College* [9] eine Druck-Prüfvorrichtung konstruiert und angefertigt, die über eine kombinierte Lasteinleitung aus Schub und stirnseitigem Druck verfügt (Bild 7, li). Nach eingehenden FE-Analysen und zahlreichen Versuchsserien konnte die Prüftechnik soweit verbessert werden, dass ein Versagen der pultruierten CFK-Stäbchen im oder am Rand des freien Bereichs erreicht werden kann (Bild 7, re).

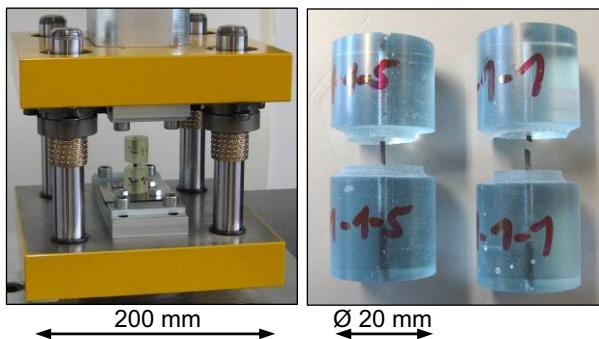


BILD 7: Prüfgestell (li), Probe mit 1 mm-CFK-Stab und zugehöriges Bruchbild (re). Zur Prüfung wird die Probe auf eine Hartmetallplatte ohne zusätzliche Maßnahmen einfach aufgestellt.

Die wesentlichen Neuerungen sind neben dem Einsatz eines geschliffenen Hartmetalls ( $E > 600.000 \text{ N/mm}^2$ ) als Proben-Auflagerplatte zur Reduktion von ungünstigen Verformungen vor allem der geänderte Aufbau der Probekörper. Im Gegensatz zu der sonst üblichen Vorgehensweise, ein Aufleimerlaminat oder -blech auf die Probe aufzukleben, wird hier der CFK-Stab in einem Rohr mit reinem EP-Harz abgegossen (Bild 8). Der Reinhärz-Ring stützt gegen Knicken und bildet eine kippsichere, plane Aufstandsfläche. Der spätere freie Bereich der Probe wird durch aufgeschobene Elastomerringe während der Probenfertigung vor einer Benetzung mit Harz freigehalten. Um eine unzulässige Spannungsspitze am Rand des „EP-Aufleimers“ zu vermeiden, wird der CFK-Stab in diesem Bereich vor dem Abgießen mit Trennmittel eingestrichen. Im Druckversuch selbst delaminiert dieser Bereich bereits bei sehr geringen Schubspannungen, so dass ein vorzeitiges schubinduziertes Versagen des Stabs verhindert wird.

Die aufgebrachte Prüflast wird entsprechend Bild 8 (re) im Wesentlichen direkt stirnseitig in das CFK-Stäbchen eingeleitet. Ein Teil der Prüfkraft fließt jedoch ebenfalls über den EP-Aufleimer und zwar vorrangig über Stoffschluss durch die Verklebung Stab-EP-Aufleimer, aber auch mittels Reibung im eingetrennten Bereich in den CFK-Stab.

Bei größeren Querschnittsflächen des Stabs und damit höheren Prüflasten sind zusätzliche Maßnahmen an der Proben-Auflandsfläche – wie z.B. eine Erhöhung des E-Moduls des Reinhärzes durch Füllstoffe oder eine lokale Umfangswicklung des CFK-Stäbchens – erforderlich, um ein vorzeitiges Versagen des EP-Aufleimers bzw. Kollabieren des Stäbchens im Lasteinleitungsbereich zu verhindern. Derzeit wird noch daran gearbeitet, für verschiedene Probenquerschnitte eine klare Aussage zu treffen, wann welche Maßnahmen erforderlich sind. Ziel ist es, mit minimalem Aufwand ein reproduzierbares Versagen im bzw. am Rande des freien Bereichs der Probe zu erreichen, um so unverfälschte Druckfestigkeiten ermitteln zu können.

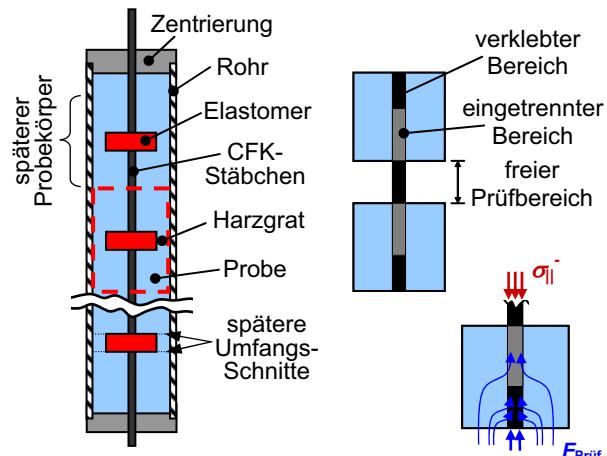


BILD 8: Fertigung der Probekörper (schematisch): Abgießen der Proben in einem Rohr (li), fertige Probe (mitte) und Kraftfluss im Versuch (re). Harzgrat und Elastomer werden nach dem Zuschneiden und stirnseitigen Planschliff der Proben durch einen Umfangsschnitt entfernt.

#### 4.1. Ergebnisse von Einzelstäbchen

Mit der oben beschriebenen Prüftechnik wurde an HT-CFK-Stäben unterschiedlichen Durchmessers und von verschiedenen Lieferanten die faserparallele Druckfestigkeit ermittelt. Es zeigen sich in Abhängigkeit von Stabdurchmesser und Lieferant markante Festigkeitsunterschiede (Bild 9). Mit Ausnahme der Stäbe des Lieferanten A zeigt der Versuch im Wesentlichen ansteigende faserparallele Druckfestigkeiten mit abnehmendem Stabdurchmesser. Der Anstieg der faserparallelen Druckfestigkeit könnte auf geringere Filament-Fehlorientierung bei kleineren Stabdurchmessern zurückgeführt werden. Dies lassen mikroskopische Aufsichten auf die Staboberfläche vermuten (Bild 10), wo bei größeren Stabdurchmessern zunehmende Fehlorientierungen bzw. Ondulationen mit ersten Filamentbrüchen zu beobachten sind. Der Längsschliff hingegen liefert keine so klaren Aussagen. Zwar zeigen die Stäbe auch im inneren Bereich deutliche Filament-Fehlorientierungen, deren Größe bzw. Häufigkeit ließ sich subjektiv

jedoch nicht mit dem Stabdurchmesser korrelieren. Zudem ist eine objektive Auswertung der Größe und Häufigkeit von Filament-Fehlorientierungen durch den dreidimensionalen Charakter bei einer rein ebenen Bildbetrachtung nicht machbar.

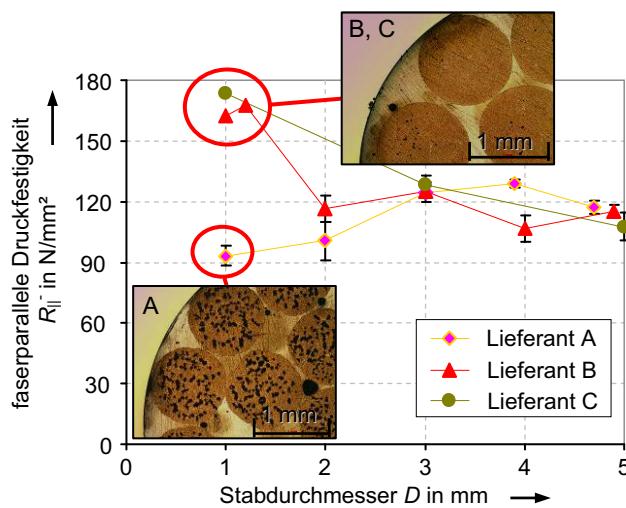


BILD 9: Erprüfte Druckfestigkeiten von verschiedenen CFK-Stäben. Ergebnisse teilweise nach der Mischungsregel auf  $\varphi = 60\%$  zurückgerechnet. Beim 1 mm Stab zeigen sich gravierende Unterschiede in der Laminatqualität der einzelnen Lieferanten (Schliffbilder).

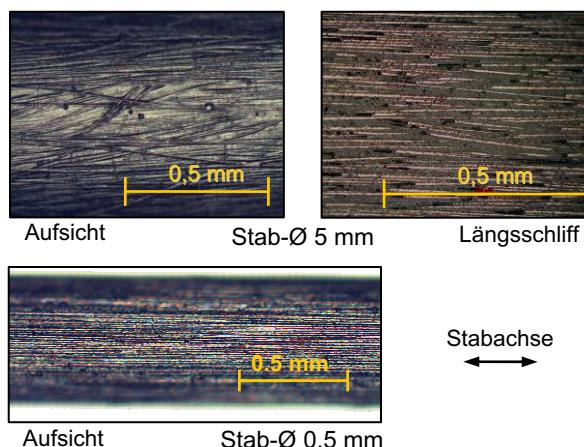


BILD 10: Exemplarische mikroskopische Aufsicht bzw. Längsschliff von einem 5 mm (oben) und einem 0,5 mm CFK-Stäbchen (unten).

Weiterhin sind neben Lufteinschlüssen bei Stäben größerer Durchmessers auch Härterisse im inneren Bereich zu finden (Bild 11), die zu zusätzlichen Fehlstellen und damit zur Reduktion der faserparallelen Druckfestigkeit führen. Die Ursache für diese Härterisse ist im Pultrusionsprozess zu suchen, bei dem für die erforderliche schnelle Aushärtung in der Regel eine große Wärmezufuhr von außen nötig ist. Infolge dessen sind bei größeren Querschnitten die Randbereiche schon ausgehärtet, während im Inneren die Reaktion noch nicht abgeschlossen ist und die Matrix chemisch, später thermisch schrumpft. Übersteigen die entstehenden Schrumpf-Eigenspannungen die

Querzugfestigkeit, treten Härtungsrisse auf, die eine Reduktion der faserparallelen Druckfestigkeit zur Folge haben.

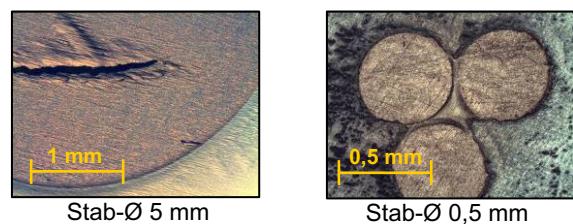


BILD 11: Exemplarische Querschliffe am 5 mm (li) bzw. 0,5 mm CFK-Stäbchen (re).

Insgesamt zeigt sich, dass durch die verfügbaren CFK-Stäbchen Druckfestigkeiten erreicht werden können, die deutlich über den derzeitigen Zulassungswerten für CFK-Holme liegen (vgl. Bild 2 bzw. Bild 9). Die durchgeführten Versuche lassen die begründete Vermutung zu, dass die Faser-Fehlorientierung bei kleineren Stabdurchmessern abnimmt und zu einem Anstieg der faserparallelen Druckfestigkeit führt. Diese Aussage ist allerdings noch zu relativieren, da zum einen im Versuch knicklastbedingt unterschiedliche Längen des freien Bereichs von 5 mm beim 1 mm Stab bis hin zu 30 mm beim 5 mm Stab vorlagen. Durch das damit einhergehende stark unterschiedliche Prüfvolumen ist ggf. ein Größeneffekt zu berücksichtigen, der in weiteren Untersuchungen erst noch abgeklärt werden muss. Zum anderen waren von den Pultrudierern keine belastbaren Aussagen über die verwendeten Rovings bzw. eingesetzten Harzsysteme und Prozessparameter erhältlich, so dass die Stäbe nur unter Vorbehalt miteinander verglichen werden können.

## 5. STABVERKLEBUNG ZUM STABVERBUND

Um die Festigkeitsvorteile der Einzelstäbchen auch im späteren Bauteil nutzen zu können ist sowohl eine entsprechende Strategie zum Anordnen und Ausrichten der Stäbchen als auch eine möglichst fehlerfreie Verklebung erforderlich. In Hinblick auf einen hohen effektiven Faservolumenanteil ist zudem die größtmögliche Packungsdichte der Stäbchen anzustreben. Der Idealfall einer 100 %igen Packungsdichte kann jedoch nur von rechteckigen Stabquerschnitten erreicht werden (Bild 12). Bislang wurden aber im Wesentlichen kreisrunde Querschnitte vertieft untersucht, da von ihnen neben Festigkeitsvorteilen und einer besseren Handhabbarkeit auch Vorteile bei der Infusionsverklebung vermutet werden. Belastbare experimentelle Ergebnisse zu diesen Vermutungen stehen jedoch derzeit noch aus. Mit den runden Stabquerschnitten wird eine maximale Packungsdichte von rund 90 % bei einer hexagonalen Anordnung der Stäbchen erreicht.

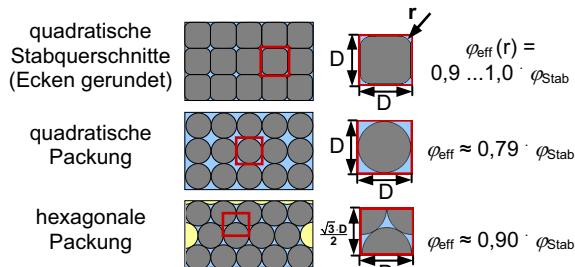


BILD 12: Packungsmodelle quadratischer und runder Stäbchen. Der effektive Faservolumenanteil  $\varphi_{\text{eff}}$  errechnet sich aus dem Faservolumenanteil des Stabs  $\varphi_{\text{Stab}}$  und den vom Packungsmodell abhängigen Stabvolumenanteilen.

Das dabei entstehende Klebeproblem unterscheidet sich im Vergleich zu gängigen Strukturklebung in der Faserverbundtechnik deutlich. Zum einen entsteht zwischen den runden Stäbchen ein Matrixwickel, durch den eine stark variable Klebschichtdicke generiert wird. Zum anderen ist die Ausgangsoberfläche der pultruierten CFK-Stäbe glatt, die im Hinblick auf unbeschädigte Filamente zum Erreichen der maximalen faserparallelen Druckfestigkeit kaum angeschliffen werden kann.

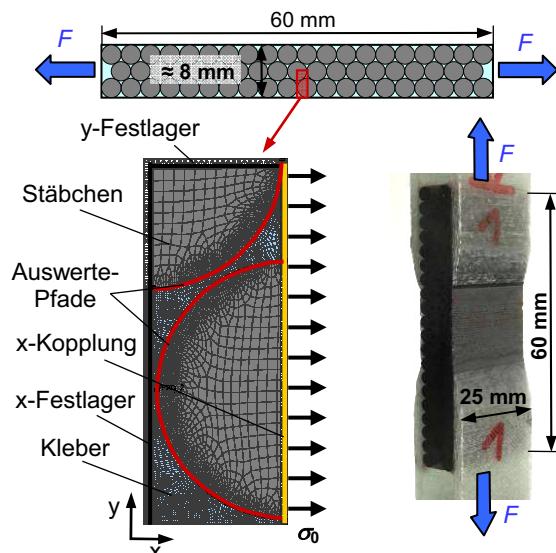


BILD 13: Querzugversuch am Stabverbund: schematisch (oben), Einheitszelle für das FE-Modell (ebener Dehnungszustand) (ii) und Probe im Zugversuch (re).

## 5.1. FE-Analyse zum Stabverbund

Stellvertretend zur Bewertung der Klebefestigkeit wurden Querzugversuche am Stabverbund mit drei Lagen CFK-Stäbchen (Stab-Ø 3 mm) in hexagonaler Anordnung betrachtet (Bild 13). In einer numerischen Parameter-Analyse der Geometrie- und Werkstoffparameter (Bild 13 bzw. Bild 14) konnten die theoretisch zu erwartenden Einflüsse auf die Querzugfestigkeit identifiziert werden. Ausgewertet wurde sowohl die Hauptnormalspannung in der Klebschicht, als auch die Zfb-Anstrengung  $f_{\text{E},\text{Zfb}}$  in den CFK-Stäbchen. Dabei hat sich gezeigt, dass von den untersuchten

Parametern (Stabdurchmesser  $d_s$ , minimale Klebschichtdicke  $t_k$  und E-Modul des Klebers  $E_k$ ) nur der E-Modul des Klebers  $E_k$  eine nennenswerte Auswirkung auf die später erzielbare Querzugfestigkeit haben wird. Bei einer Erhöhung von  $E_k$  über den gängigen E-Modul der EP-Harze ( $E_{\text{EP}} = 3000 \dots 3500 \text{ N/mm}^2$ ) hinaus ist rechnerisch eine Verbesserung von bis zu 25 % zu erwarten. Hintergrund ist eine Vergleichsmäßigung des Tragverhaltens im Stabverbund, wenn sich der E-Modul des Klebers  $E_k$  an den E-Modul in Querrichtung des CFK-Stäbchens  $E_{\perp}$  annähert.

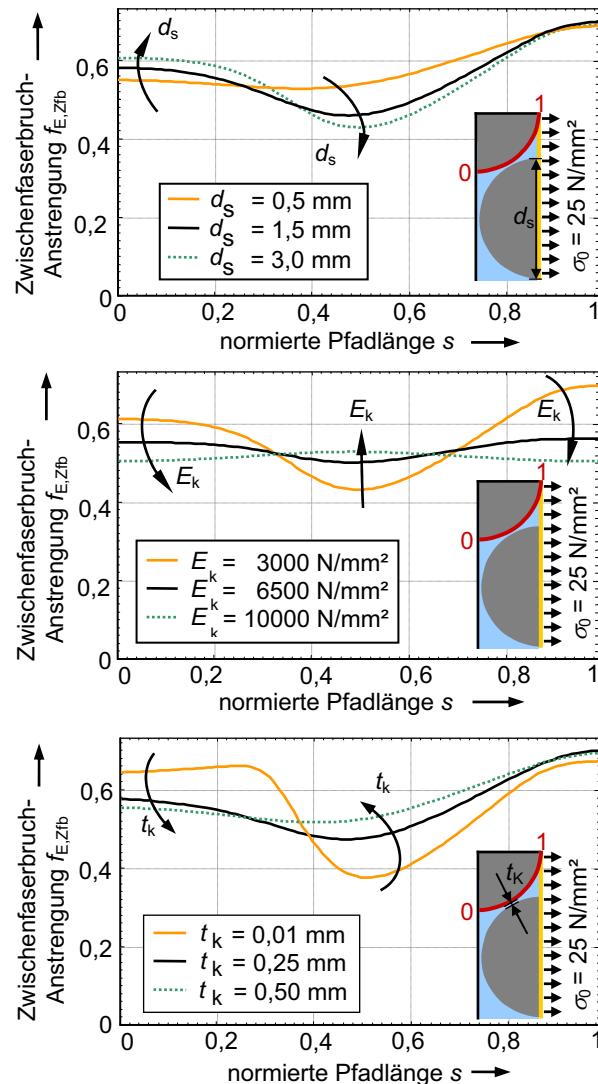


BILD 14: Exemplarische Ergebnisse für die Zwischenfaserbruch-Anstrengung der FE-Parameteranalyse. Die angelegte Querzugspannung von  $\sigma_0 = 25 \text{ N/mm}^2$  entspricht der gemessenen Querzugfestigkeit einer konventionell gefertigten Referenzprobe.

Die minimale Klebschichtdicke zwischen den Stäben  $t_k$  als auch der Stabdurchmesser  $d_s$  scheinen kaum nennenswerten Einfluss auf die erzielbare Querzugfestigkeit des Stabverbunds zu haben. Zwar ändert sich der Verlauf der Zfb-Anstrengung über den Umfang des Stäbchens bei varierender

Klebschichtdicke bzw. unterschiedlichen Stabdurchmessern deutlich, jedoch bleibt der Maximalwert annähernd konstant.

## 5.2. Versuchsergebnisse zum Stabverbund

Im Experiment wurden neben der Variation des Kleber-E-Moduls durch Füllstoffzugabe vor allem verschiedene EP-Harze zum Verkleben und unterschiedliche Oberflächen-Vorbehandlungen der Stäbchen getestet (Bild 15). Die Herstellung der Proben erfolgte als 150 mm breiter Gurtabschnitt im Handlaminierverfahren in einer Negativ-Form. Während des Aushärtens wurden die Stäbe über einen aufgelegten Stahlstempel leicht angedrückt. Nach dem Aushärteten und beidseitigem Aufkleben von GFK-Aufleimern folgte das Zusägen in 5 je 25 mm breite Querzugproben (Bild 13). Die Mikroskopie zeigte durchweg eine gute Probenqualität mit nur wenigen Fehlstellen. Der sich in diesem Fertigungsverfahren ergebende minimale Stababstand  $t_K$  lag unter 0,1 mm.

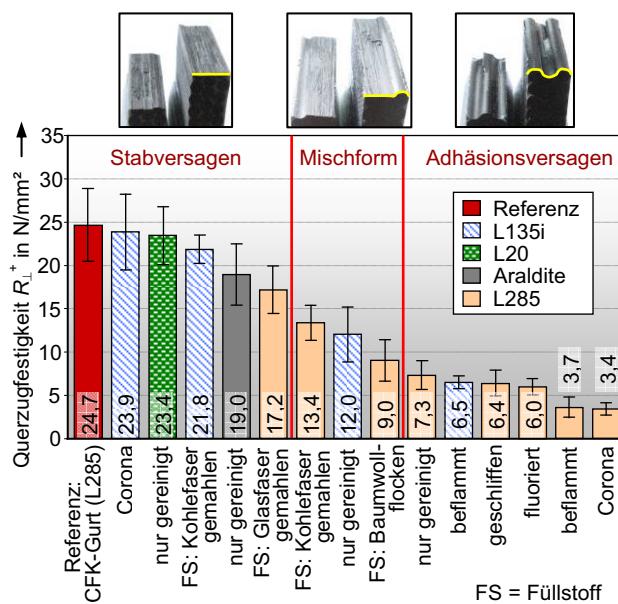


BILD 15: Experimentelle Ergebnisse der Querzugfestigkeit  $R_{\perp}$  am Stabverbund. Getestet wurden sowohl unterschiedliche Harzsysteme (teilweise mit Füllstoffen angedickt) als auch verschiedene Oberflächen-Vorbehandlungen der CFK-Stäbchen. In allen Fällen wurden die Stäbe vorweg mit Aceton gereinigt.

Im Versuch zeigten sich deutliche Unterschiede sowohl in den erzielbaren Querzugfestigkeiten, als auch im Versagensbild (Bild 15). Zwei grundsätzliche Bruchformen traten auf: Zum einen ein Trennbruch in der Grenzfläche Kleber-Stab, der bei den sehr geringen Querzugfestigkeiten unter 8 N/mm² auftrat und als reines Adhäsionsversagen – also als ein eigentliches „Klebe-Problem“ – betrachtet werden kann. Zum andern ein Stabversagen, bei dem der Trennbruch senkrecht zur Belastungsrichtung erfolgte und quer durch die CFK-Stäbe lief. Bei dieser Versagensform, die Oberhalb von 15 N/mm² auftrat, kann ein

Kohäsionsversagen im Stab selbst vermutet werden. Die Schwachstelle des Stabverbunds ist in diesem Fall in den Stab verlagert, so dass durch eine Verbesserung der Klebefestigkeit zum Stab vorerst keine weitere Steigerung der Querzugfestigkeit des Stabverbunds zu erwarten ist. Hier gilt es die Stabqualität und damit die eigentliche Querzugfestigkeit der Stäbchen an sich weiter zu verbessern.

Aus den experimentellen Ergebnissen lassen sich drei Kernaussagen ableiten:

- Die Oberflächenvorbehandlungen wirken sich im Wesentlichen negativ aus
- Die eingesetzten Harze bzw. Kleber sind zur Stabverklebung unterschiedlich gut geeignet
- Füllstoffe steigern die Querzugfestigkeit merklich

Insbesondere die über die Füllstoffe erreichbaren Steigerungen der Querzugfestigkeit sind besonders erwähnenswert. Neben der ursprünglichen Motivation, entsprechend der FE-Ergebnisse durch eine Steigerung des Kleber-E-Moduls  $E_K$  eine Verbesserung zu erlangen, scheinen noch weitere Mechanismen wirksam zu sein. Die sich mit den Füllstoffen ergebenden E-Moduln des Klebers ( $E_{EP+gem. CFK} = 7350 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $E_{EP+gem. GFK} = 7750 \text{ N/mm}^2$ ) versprachen durch die Annäherung an den Quer-E-Modul des CFK Stäbchens  $E_{\perp}$  nach Bild 14 eine Verbesserung der Querzugfestigkeit von maximal 25 %. Tatsächlich erreicht wurde aber eine Festigkeitssteigerung um 80 % (CFK gemahlen) bzw. sogar 140 % (GFK gemahlen) gegenüber der Variante mit ungefülltem Klebeharz. Ob diese weit stärkeren Anstiege auf eine bessere Adhäsionsfestigkeit der gefüllten Harzsysteme oder auf rein bruchmechanische Aspekte zurückzuführen sind, ist nach derzeitigem Stand noch offen. Zentrale Erkenntnis aus den bislang durchgeföhrten Querzugversuchen ist, dass mit den im Handlaminierverfahren hergestellten Stabverbunden durchaus die Querzugfestigkeit konventionell gefertigter CFK-UD-Laminate erreicht werden kann. Außer der Reinigung der CFK-Stäbchen mit Aceton scheinen keine weiteren und ggf. aufwändigeren Oberflächenvorbehandlungen erforderlich zu sein.

## 6. STABAUSLAUF ZUR QUERSCHNITTS-ANPASSUNG

Mit einer der wesentlichen Vorteile der Faserverbunde ist die praktisch stufenlose Querschnittsanpassung, um den Werkstoff leichtbaugerecht entsprechend des jeweiligen Spannungsniveaus bestmöglich auszunutzen. Dieser Vorteil darf durch die Stäbchen-Technologie nicht geschmälerert werden. Während bei konventionell gefertigten CFK-Gurten eine fast kontinuierliche Querschnittsänderung durch

sukzessives Auslaufen bzw. Zuschneiden einzelner Rovings möglich ist, bringt das einfache Ablängen der CFK-Stäbchen je nach Stabquerschnitt durchaus nennenswertere Steifigkeitssprünge mit sich. Damit hieraus keine Festigkeitseinbußen resultieren, muss der Stabauslauf gerade in Hinblick auf den praktischen Einsatz gesondert untersucht werden.

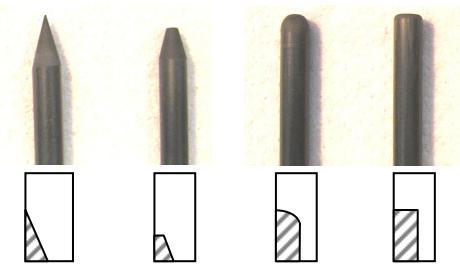


BILD 16: Untersuchte Geometrien des Stabauslaufs am Beispiel des 3 mm Stabs: spitz, konusförmig, rund und stumpf.

Im ersten Ansatz wurden hierzu neben den Stabdurchmesser  $d_s$  vor allem unterschiedliche Geometrien der Stabenden betrachtet (Bild 16). Die ausgesuchten Geometrien sind rotations-symmetrisch gestaltet und versprechen weiterhin eine gleichbleibende Handhabbarkeit der Stäbchen während des Drapierens. Im späteren Anwendungsfall könnten diese Endgeometrien durch automatisierbares Anspitzen erzeugt werden.

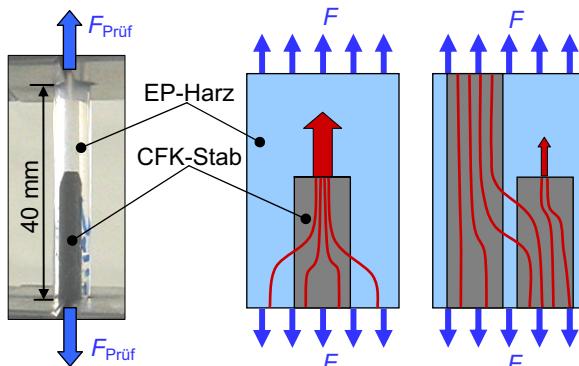


BILD 17: Belastung des in EP-Harz endenden CFK-Stäbchens im Zugversuch (li) und zugehöriger Kraftfluss (schematisch, mitte). Im Stabverbund lagert sich die Last bereits vor dem Stabende in die Nachbarstäbe um (re) und das eigentliche Stabende wird im Vergleich zum endenden Einzelstab entlastet.

Zur Untersuchung wurde der im Reinarz endende Einzelstab unter Zugbelastung herangezogen. Im Vergleich zum Stabende im Stabverbund stellt dieser Grenzfall die kritischere Variante dar, da keine Lastumlagerung in Nachbarstäbe erfolgen kann (vgl. Bild 17).

## 6.1. FE-Analyse und Versuchsergebnisse zum Stabauslauf

Ausgewertet wurden analog zum Querzugversuch des Stabverbunds die Hauptnormalspannungen im Reinhartz  $\sigma_1$  als auch die Faserbruch- und

Zwischenfaserbruchanstrengungen  $f_E$  im CFK-Stäbchen. Sowohl in der FE, als auch später im Versuch, wurde die Probe rotationssymmetrisch ausgeführt. Der Durchmesser der Probe  $d_{\text{Probe}}$  ergibt sich aus dem variiierenden Stabdurchmesser  $d_s$  und einer in der Dicke konstant gehaltenen Reinharszschicht  $t_{\text{Harz}} = 2 \text{ mm}$  zu:

$$(1) \quad d_{\text{Probe}} = d_s + 2 \cdot t_{\text{Harz}}$$

Durch die hohe Dehnsteifigkeit des Stäbchens im Vergleich zum Reinharz zieht das CFK-Stäbchen den Hauptteil der Lasten auf sich. Für einen direkten Vergleich der verschiedenen Stabdurchmesser wurde daher für die FE-Rechnung eine Einheitslast  $F$  in Bezug auf den Stabquerschnitt  $A_{\text{Stab}}$  definiert:

$$(2) \quad F = 1 \text{ N/mm}^2 \cdot A_{\text{Stab}}$$

Im Rahmen der FE-Parameteranalyse hat sich der Stabdurchmesser als einflussreichster Parameter bei allen Geometrien des Stabauslaufs erwiesen und im Wesentlichen die Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  im Reinharz als limitierende Größe gezeigt. Die Ergebnisse seien am Beispiel des stumpf endenden Einzelstabs diskutiert (Bild 18). Mit ansteigendem Stabdurchmesser stellt sich in dem ausgewerteten stirnseitigen Grenzflächenbereich eine Zunahme der Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  ein. Diese Zunahme kann direkt über die relative Klebefläche erklärt werden: Die zu übertragende Last steigt mit dem Stabquerschnitt und damit quadratisch mit dem Stabdurchmesser an. Die zur Verfügung stehende Klebefläche in Stablängsrichtung kann im ersten Ansatz als Oberfläche des Stabs angenommen werden, die sich nur linear mit dem Stabdurchmesser vergrößert. Folglich muss die Belastung der Klebefläche ebenfalls linear mit dem Durchmesser steigen, was sich im Spannungsniveau des Harzes widerspiegelt (Bild 18).

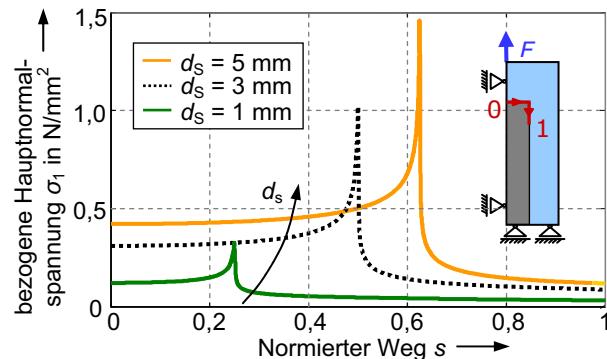


BILD 18: Verlauf der Hauptnormalspannung im Reinharz des in EP-Harz stumpf endenden CFK-Einzelstäbchens. Der Einfluss des Stabdurchmessers ist markant.

An der Kante des Stabendes liegt eine dominierende Spannungsüberhöhung vor, die mit durch die dort vorliegende geometrische Singularität

hervorgerufen wird. Zur Auswertung wurde daher nach einer Konvergenzanalyse der Spannungswert um 0,2 mm neben der Spannungsspitze herangezogen. Aus der maximalen Vergleichsspannung und der im Versuch ermittelten realen Bruchlast  $F_{\text{Bruch}}$  lässt sich nun in Anlehnung an (2) eine „fiktive homogen verteilte Stabspannung“  $\sigma_{\parallel \text{Stab}}$  im CFK-Stäbchen angeben, bei der ein Versagen der Klebung Stab-Harz eintritt:

$$(3) \quad \sigma_{\parallel \text{Stab}} = \frac{F_{\text{Bruch}}}{A_{\text{Stab}}} = \frac{R_m}{\sigma_{1 \text{ max}}}$$

Die nach (3) errechneten Stabspannungen im Versagensfall aus der FE-Rechnung sind den Ergebnissen aus dem Experiment in Bild 19 gegenübergestellt.

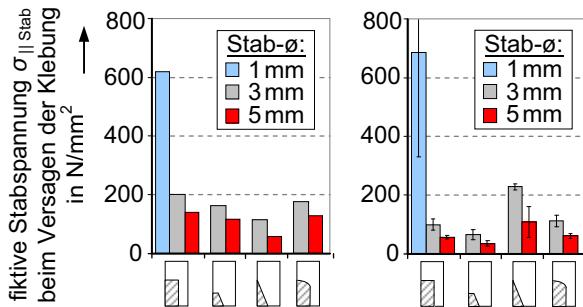


BILD 19: Rechnerische fiktive Stabspannungen beim Versagen der Klebung Stab-Harz von unterschiedlichen Stabausläufen und Stabdurchmessern nach FE-Rechnung (li) und Versuch (re).

Auf den ersten Blick ergibt sich qualitativ eine recht gute Übereinstimmung in Hinblick auf die Auswirkungen des Stabdurchmessers. Rein quantitativ sind aber besonders im Vergleich der verschiedenen Geometrien des Stabauslaufs deutliche Unterschiede zwischen Numerik und Versuch feststellbar. Besonders deutlich wird das im Fall des spitzen Stabauslaufs. Während in der FE für diese Variante bei gleichem Stabdurchmesser die geringste Versagenslast prognostiziert wird, zeigt der Versuch genau das Gegenteil. Ursache dieser Diskrepanz sind zum einen ein fehlendes akkurate Bruchkriterium für das Reinhart in der FE-Rechnung, als auch die Vernachlässigung sämtlicher stofflichen Nichtlinearitäten. In dieser Situation kann mit der FE zwar prinzipiell das Tragverhalten analysiert werden, zuverlässige Aussagen über die erreichbaren Bruchlasten lassen sich aber nur im Versuch ermitteln.

Generell bleibt festzuhalten, dass sich mit den kleineren Stabdurchmessern die höchsten Bruchlasten über einen Stabauslauf übertragen lassen. Die experimentell ermittelten fiktiven Stabbruchspannungen erreichen für den Einzelstab noch nicht die ermittelten Stabfestigkeiten. Jedoch ist hierbei zu berücksichtigen, dass mit der vorliegenden Konfiguration der Extremfall eines endenden Einzelstabs betrachtet wurde. In einem Stabverbund wird das Stabende nach Bild 17

deutlich weniger belastet, so dass hier entsprechend höhere Versagenslasten zu erwarten sind. Belastbare Ergebnisse dazu werden nach noch ausstehenden Zugversuchen an abgestuften Stabverbunden erwartet.

## 7. AUSBLICK

Die experimentellen und numerischen Ergebnisse zeigen bereits nach derzeitigem Stand Chancen hinsichtlich einer Verbesserung der faserparallelen Druckfestigkeit mittels Stäbchen-Technologie gegenüber konventionell gefertigten monolithischen UD-Strukturen. Die dafür eingesetzten CFK-Stäbchen wurden bisher als fertige Halbzeuge eingekauft, ohne dabei Einflüsse auf die Werkstoff- und Prozessparameter bei der Stabherstellung nehmen zu können. Um dies zu ändern wird der nächste Schwerpunkt der Arbeiten auf der Herstellung eigener CFK-Stäbchen liegen, so dass Parameter gezielt verändert werden können. Hierbei werden Einflüsse durch Fasertyp, Harzsystem, Faservolumengehalt, und Abzugskräfte erwartet. Auch welche Querschnittsform die besten Druckfestigkeiten liefert soll untersucht werden.

## 8. DANKSAGUNG

Den Studenten *D. Feldten, W. Friedrichs, F. Ganzert, D. Gunst, und M. Klimach* gilt Dank für ihre inhaltlichen Beiträge, dem Technikum des Fachgebiets *KLuB* für die Herstellung von Bau- und Prüfvorrichtungen und der *DFG* für die finanzielle Unterstützung.

## 9. LITERATUR

- [1] Baker, D.J.; Rousseau, C.Q.; Evaluation of carbon-rod reinforced crippling strength specimens; American Institute Of Aeronautics and Astronautics, AIAA-99-1282, 1999
- [2] Baker, D.J.; Rousseau, C.Q.; Design and Evaluation of a Bolted Joint for a Discrete Carbon-Epoxy Rod-Reinforced Hat Section; NASA Technical Memorandum 110277, 1996
- [3] Berbinau, P.; Soutis, C.; Guz, I. A. Compressive failure of 0° unidirectional carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) laminates by fibre microbuckling; Composites Science and Technology 59, 1451-1455, 1999
- [4] Budiansky, B.; Fleck, N. A.; Compressive failure of fibre composites; Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 41, No. 1; 183-211; 1993
- [5] Christensen, R.M.; Compressive failure of composites using a matrix-controlled failure criterion with the kink band mechanism; Mechanics of Materials 32, 505-509, 2000
- [6] Clarke, A.; Wisnom, M.R.; Potter, K; Comparison of mechanical properties of Graphlite® unidirectional carbon rod with conventional prepreg; Plastics, Rubber and Composites Processing and Application, Vol. 26, No. 10, 447-450; 1997
- [7] Creighton, C.J.; Clyne, T.W.; The compressive strength of highly-aligned carbon-fibre/epoxy composites produced by pultrusion; Composite Science and Technology, Vol. 60, 525-533, 2000

- [8] Curtis, P.T.; Gates, J.; Molyneux, C.G.; An improved engineering test method for measurement of the compressive strength of unidirectional carbon fibre composites; Composites, Vol. 22, No. 5; 1991
- [9] Häberle, J.G.; Matthews, F.L.; An improved technique for compression testing of unidirectional fibre-reinforced plastics; development and results; Composites, Vol. 25, No. 5, 1994
- [10] Hahn, H.T.; Sohi, M.M.; Buckling of a Fiber Bundle Embedded in Epoxy; Composites Science and Technology, Vol. 27, 25-41; 1986
- [11] Huh, W.; Kumar, S.; Adams, W.; Microstructure Analysis of High Performance Fibers in Compression; Polymer Engineering and Science, Vol. 43, No. 3, 2003
- [12] IASB: HSB, Handbuch Strukturberechnung
- [13] Kyriakides, S.; Ruff, A.E.; Aspects of the Failure and Postfailure of Fiber Composites in Compression; Journal of Composites Materials, Vol. 31, No. 16; 1997
- [14] Marske, J.; Graphlite Carbon Rod; [www.continuo.com/marske/](http://www.continuo.com/marske/)
- [15] N. N.; Vorläufige Dimensionierungswerte für Holme von Segelflugzeugen und Motorseglern, LBA, 1981
- [16] Rogers et al.; Unidirectional carbon fiber reinforced pultruded composite material having improved compressive strength, United States Patent 5324563, 1994
- [17] Schultheisz, C.R.; Waas, A. M.; Compressive failure of composites, Part I: Testing and micromechanical theories; Progress in Aerospace Sciences, Vol. 32, 1-42, 1996
- [18] Slaughter, W.S.; Fleck, N. A.; Microbuckling of fiber composites with random initial fiber waviness; Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 42, No. 11, 1743-1766; 1994
- [19] Squires, C.A.; Netting, K.H.; Chambers, A.R.; Understanding the factors affecting the compressive testing of unidirectional carbon fibre composites; Composites Part B; 2006