

# Geflochtene FVK-Crashstrukturen – Ergebnisse und Fazit

Viktor Reimer<sup>1</sup>, Katharina Bethlehem-Eichler<sup>2</sup>, Thomas Gries<sup>1</sup>, Lutz Eckstein<sup>2</sup>

*1: Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University, Aachen*

*2: Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University, Aachen*

## Zusammenfassung

Automobile Strukturbauteile werden zunehmend aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) hergestellt. Neben dem Potenzial Gewicht einzusparen, weisen Crashstrukturen aus geflochtenen FVK ein höheres Energieabsorptionsvermögen im Vergleich zu metallischen Strukturen auf. Dabei ermöglichen moderne Flechttechnologien eine schnelle automatisierte Produktion von komplexen, endkonturnahen textilen Vorformlingen, sogenannten Preforms, in nur einem Prozessschritt. Ergänzt durch das Harzinjektionsverfahren ist mithilfe der Flechttechnologie eine serientaugliche Fertigung von rohrförmigen Hohlkörpern möglich.

Das Ziel des Projektes „Geflochtene FVK-Crashstrukturen“ war die Beschreibung der strukturellen Eigenschaften geflochtener Strukturen aus faserverstärktem Kunststoff und deren simulative Abbildung mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM).

In diesem Projekt wurden quasi-statische und dynamische Versuche an flachen und rohrförmigen geflochtenen FVK-Proben durchgeführt. Quasi-statisch wurden flache und rohrförmige Proben in Zug-, Druck-, Delamination-, Scher- und Torsionstests untersucht. Für diese Tests wurden bestehende Normen verwendet. In den Fällen, in denen Normen auf geflochtene Strukturen nicht angewendet werden konnten, wurden die Testmethoden angepasst oder neuentwickelt. Beispielsweise wurde eine neue Testmethode entwickelt, um die Materialeigenschaften rohrförmiger FVK-Proben mittels quasi-statischer Versuche zu bestimmen. Die Entwicklung dieser Testmethode beinhaltete daneben noch die Konstruktion eines geeigneten Spannsystems, um die Proben in der Prüfmaschine befestigen zu können.

Um das Energieabsorptionsvermögen charakterisieren zu können, wurden die rohrförmigen Proben desweiteren im Fallturmversuch getestet, so dass die erforderlichen Materialparameter für die numerische Simulation bestimmt werden konnten. Die Simulationsmodelle beinhalten sowohl ein passendes Materialmodell zur Abbildung geflochtener Strukturen als auch eine Möglichkeit den Delaminationsvorgang abzubilden. Die Ergebnisse der Versuche und Simulationen wurden in einem Daten- und Auslegungstool implementiert, so dass zukünftige Strukturen mit geringerem Aufwand für reale Belastungsbedingungen entworfen werden können und das Versagen der Strukturen besser vorhergesagt werden kann.

## Einleitung

Steigende Energiekosten und umweltspezifische Einschränkungen haben zu einer steigenden Nachfrage an FVK in der Automobilindustrie geführt. Zusätzlich zu dem Potenzial Ge-

wicht einzusparen, besitzen FVK-Crashstrukturen im Vergleich zu metallischen Strukturen ein höheres Energieabsorptionsvermögen. Grundlagenuntersuchungen haben gezeigt, dass geflochtene FVK-Strukturen aufgrund ihrer überdurchschnittlichen Energieabsorptionsvermögens als Basis für Crashstrukturen besonders geeignet sind [1, 2, 3].

Großserientaugliche Prozesse für die Produktion von FVK-Komponenten, wie zum Beispiel das Flechten, haben sich in den letzten Jahren signifikant entwickelt [4]. Diese Technologie erlaubt eine schnelle, automatisierte Produktion von komplexen, endkonturnahen faserverstärkten Vorformlingen, den sogenannten Preforms, in einem Prozessschritt. Ergänzt durch das Harzinjektionsverfahren können mit der Flechttechnologie große hohle rohrförmige Komponenten produziert werden.

Momentan werden FVK-Crashstrukturen noch selten in Automobilanwendungen genutzt, da die Vorhersagen des Materialverhaltens noch unzureichend sind. Die Vorauslegung von Crashstrukturen basiert auf Simulationen – unzureichende Genauigkeit der Simulationen schließt die Nutzung von FVK-Komponenten in einer Serienproduktion aus. Die gängigsten Berechnungsansätze für FVK berücksichtigen nur die Eigenschaften von unidirektionalen und gewebeverstärkten Materialien. Biaxiale und triaxiale Verstärkungen, wie zum Beispiel bei geflochtenen Strukturen, können derzeit nicht auf makromechanischer Ebene dargestellt werden [5]. Die Vorhersagegenauigkeit des Werkstoffverhaltens von FVK ist in der quasistatischen Analyse mit impliziter Berechnungssoftware, z. B. Ansys (Ansys Inc., Cannonsburg, USA) hinreichend genau. Die Simulation von dynamischen Lastfällen unter Strukturauflösung (Crushing) mit expliziten Lösungsprogramme wie LS-Dyna (Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA) oder PamCrash (ESI Group, Paris, France) ist jedoch noch eine Herausforderung [6, 7].

Detaillierte Untersuchungen des Einflusses der Geflechtstruktur auf das Energieabsorptionsverhalten und die Crasheigenschaften liegen derzeit nicht vor [1, 2, 3]. Die Kenntnis dieses Einflusses ist jedoch für eine werkstoffgerechte Konstruktion unverzichtbar. Die zur Simulation notwendigen Kennwerte umfassen die strukturmechanischen Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von Fasermaterial, Faserorientierung (Flechtwinkel) sowie der Interaktion von Faser und Matrix. Standardisierte Testmethoden zur Untersuchung des mechanischen Materialverhaltens geflochtener Strukturen und somit der Ermittlung dieser Kennwerte existieren nicht.

In Vorarbeiten, finanziert durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT), wurde das Energieabsorptionsverhalten von geflochtenen Crashstrukturen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen untersucht [8]. Flachproben und rohrförmige Prüfkörper variierten in Flechtwinkel und Stehfadenanteil. Die Analyse der Flachproben erfolgte mittels Teststandards für gewebeverstärkte FVK. Die Rohrproben wurden in dynamischen Fallturmversuchen geprüft. Das Energieabsorptionsverhalten der Prüfkörper hing sowohl von dem Flechtwinkel als auch vom Stehfadenanteil ab. Bei kleineren Flechtwinkeln konnte die Energie besser absorbiert werden. [8] Diese Abhängigkeit ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht vollständig beschreibbar, weshalb in diesem Projekt angepasste Testprozeduren entwickelt wurden.

## Prüfungen und Ergebnisse

### Quasi-statische Versuche

#### *Flachproben*

Folgende Standards wurden entsprechend einer Recherche von Normen und Standards quasi-statischer Versuche an geflochtenen FVK-Flachproben für weitere Untersuchungen ausgewählt:

- DIN EN ISO 527-4 Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 4: Testbedingungen für isotrope und anisotrope faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe.
- DIN EN ISO 14126 Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene
- DIN EN ISO 14130 Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken
- DIN EN 6033 Luft- und Raumfahrt – Kohlenfaserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren – Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrates – Mode I –  $G_{IC}$  (Entwurf)

Diese Standards wurden im Detail auf ihre Anwendbarkeit auf Flachproben aus geflochtenem FVK überprüft. Es wurden folgende Strukturparameter festgelegt: zwei unterschiedliche Faserfeinheiten (800 tex und 1600 tex) und drei unterschiedliche Faserorientierungen (Flechtwinkel, gemessen zwischen der Produktionsrichtung und einer Faser: 30°, 45° und 60°). Dies ermöglichte den Einfluss der Faserfeinheit und Orientierung auf das Energieabsorptionsvermögen geflochtener Crashstrukturen separat zu untersuchen. Um die Anzahl der Tests zu minimieren, wurden Proben mit einer Feinheit von 1600 tex nur mit einem Flechtwinkel von 45° untersucht. Die Werte für Proben mit 1600 tex bei einem Winkel von 30° und 60° wurden mithilfe der Ergebnisse der Proben mit 800 tex extrapoliert.

Während der Durchführung der Versuche stellte sich heraus, dass manche Standards nur eine minimale Anpassung benötigten. Für Andere ist eine detailliertere Analyse notwendig. So konnten die Testergebnisse der Delaminationsversuche (hier Mode I) aufgrund der unzureichenden Biegefestigkeit der Proben in Produktionsrichtung nicht genutzt werden. Um die charakteristischen Ergebnisse der Scherversuche genauer untersuchen zu können, sollte, die im Jahr 1986 erstellte, Norm DIN 65 148 angepasst werden.

#### *Rohrförmige Proben*

Es konnte keine standardisierte Testmethode für geflochtene rohrförmige FVK gefunden werden. Ein Standard für rohrförmige FVK-Proben (ISO 6259-1) beschreibt einen Zugversuch mit Proben, die aus einem thermoplastischem Rohr geschnitten werden. Druck- und Torsionstests werden nicht beschrieben. Die Standards und Verfahren zur Untersuchung isotroper rohrförmiger Proben sind nicht auf Prüfverfahren für rohrförmige geflochtene FVK übertragbar. Aus diesem Grund wurde eine Testmethode zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften rohrförmiger geflochtener FVK-Proben entwickelt.

Für die Zug-, Druck- und Torsionstests wurde eine Prüfmaschine der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm mit folgenden Maschinendaten genutzt:

- Maschinentyp Zwick Z250
- Max. Zug-/ Druckbelastung 250 kN
- Max. Torsionsbelastung 2000 Nm

Eine einheitliche Spannvorrichtung für rohrförmige geflochtene FVK ist auf dem Markt nicht erhältlich. Daher war ein Teilziel des Projektes eine passende Vorrichtung zu entwickeln. Drucktests an Rohrproben zur Bestimmung des quasi-statischen Materialverhaltens wurden an Proben mit Faserfeinheiten von 800 tex und 1600 tex und Flechtwinkel von 30°, 45° und 60° durchgeführt. Zug- und Torsionstests wurden jeweils nur mit einer einzigen Probe durchgeführt, um die Funktion der Spannvorrichtung zu testen. In Abbildung 1 ist eine geflochtene Rohrprobe für quasi-statische Versuche dargestellt.

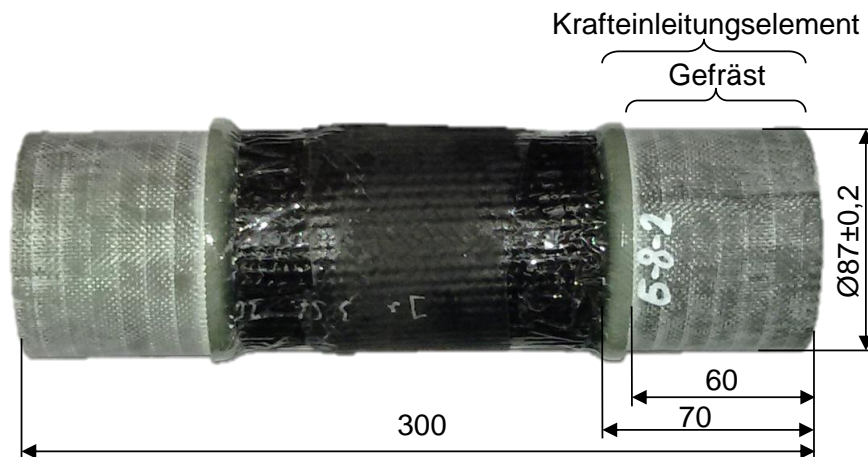


Abbildung 1: Abmaße einer Probe für quasi-statische Versuche in mm

Für die Bestimmung von Werkstoffkennwerten rohrförmiger geflochtener FVK-Proben mittels Zug-/Druck-Torsionsprüfverfahren wurden keine Prüfnormen gefunden. Für diesen Zweck wurde eine Testmethode entwickelt, welche in Abbildung 2 dargestellt ist. Die Methode beschreibt eine Vorgehensweise zur Ermittlung wichtiger Kennwerte in einem Zug-/Druck-Torsionsprüfverfahren an geflochtenen FVK-Rohren. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Spannvorrichtungen für Rohre entworfen, eine für Zugversuche und eine für Druck- bzw. Torsionsversuche. Die Spannvorrichtung für Druckversuche ist einfacher in der Handhabung und schneller einzustellen, jedoch aufgrund erforderlicher Hydraulik auch komplexer.

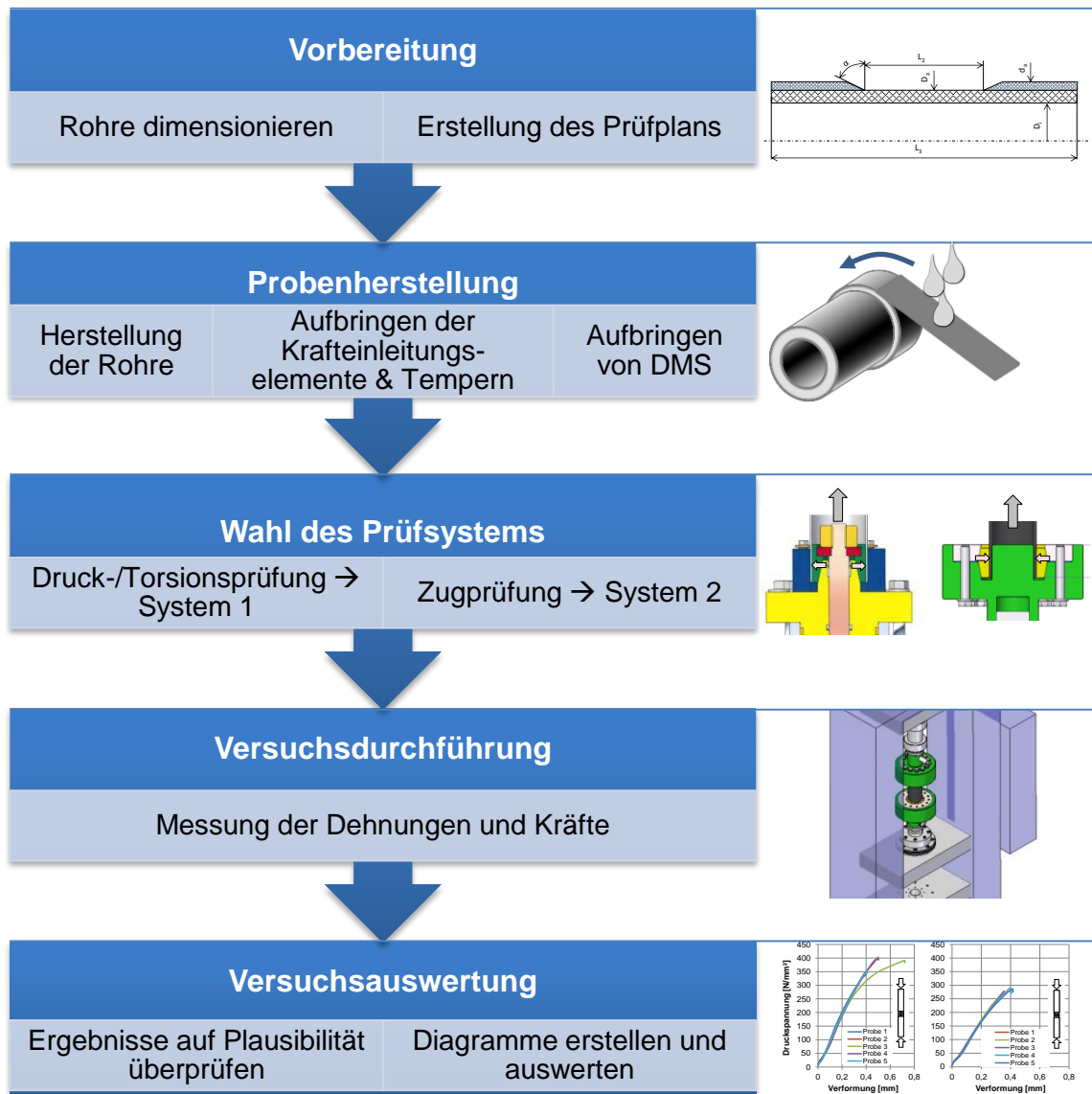


Abbildung 2: Ablauf des quasi-statischen Prüfverfahrens für rohrförmige FVK-Proben

### Dynamische Versuche

Zur Charakterisierung des Energieabsorptionsvermögens geflochtener CFK-Strukturen wurden rohrförmige Proben mit einem ebenen Impaktor und einem Energieeintrag von 9,5 kJ im Fallturmversuch getestet. Dabei wurden sechs verschiedene Varianten mit 30°, 45° bzw. 60° Flechtwinkel sowie 800 tex bzw. 1600 tex Faserfeinheit untersucht. Jeder Prüfkörper wurde vor dem Versuch an einer Rohrkante mit einer 30° Fase versehen. Diese diente als Initialisierungshilfe für den Deformationsvorgang.

Alle Proben zeigten ein ähnliches Deformationsverhalten unabhängig von Flechtwinkel und Faserfeinheit (Abbildung 3 und 4). Es rollten drei Lagen nach außen und drei Lagen nach innen ab, was zu einer kontinuierlichen Deformation der Proben führte.

Der Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe (Abbildung 4) zeigt deutlich, dass mit kleiner werdender Faserfeinheit die Kraftaufnahme ansteigt. Dies ist darin begründet, dass bei kleiner werdender Faserfeinheit eine höhere Anzahl an Flechtfäden benötigt wird, um bei gleichem



Flechtwinkel wieder ein kompaktes Geflecht zu erzeugen. Hierdurch ergibt sich eine höhere Anzahl an Kreuzungspunkten der Fäden im Geflecht, die somit zu einem höheren Reibungspotenzial während der Deformation führen. Der Vergleich des ersten Kraftpeaks der Proben mit gleicher Faserfeinheit zeigt, dass der Kraftpeak bei Proben mit einem kleinen Flechtwinkel höher ist als bei Proben mit großem Flechtwinkel. Bei kleiner werdendem Flechtwinkel sind die Fäden stärker in Belastungsrichtung ausgerichtet, was zu einer höheren Energieaufnahme führt. Zusammengefasst führt dies zu der Aussage, dass Proben mit kleinem Flechtwinkel ein höheres Energieabsorptionspotenzial aufweisen als Proben mit großem Flechtwinkel.

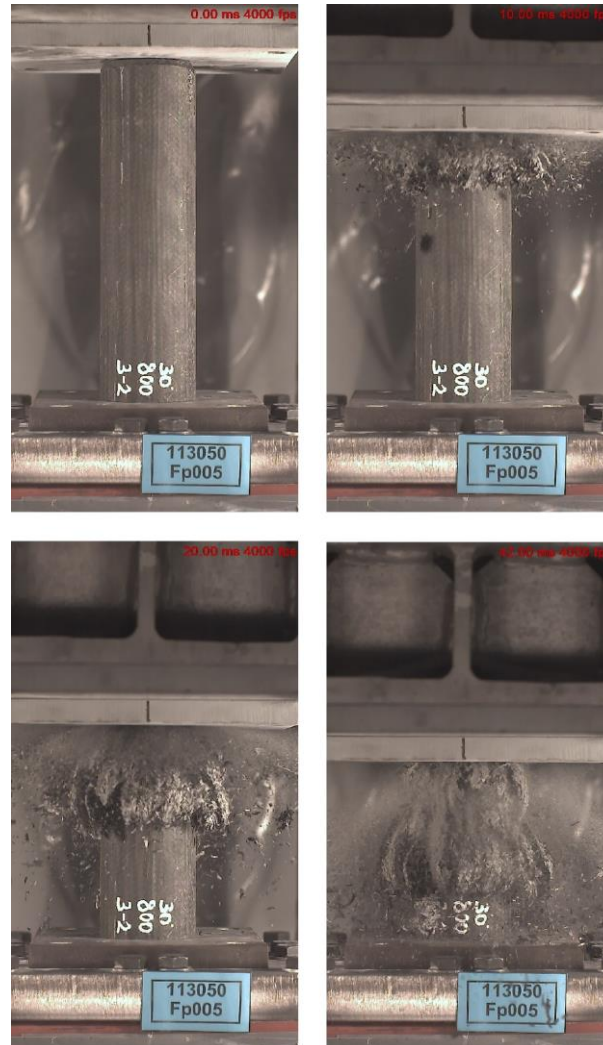


Abbildung 3: Deformationsverhalten geflochtener FVK-Crashstrukturen (30° Flechtwinkel, 800 tex)

Des Weiteren zeigt der Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe, dass mit zunehmendem Deformationsweg das Kraftniveau der Proben mit großem Flechtwinkel ansteigt, während das Niveau der Proben mit kleinem Flechtwinkel zunächst langsam sinkt und dann auf einem konstanten Level bleibt. Bei Proben mit einem großen Flechtwinkel trat bei zunehmendem Deformationsweg eine Blockbildung des zerstörten Materials im Prüfkörper auf, die gegen Ende der Deformation zu einem Kraftanstieg führte. Dieses Phänomen zeigte sich bei Proben mit kleinem Flechtwinkel nur gering oder gar nicht.

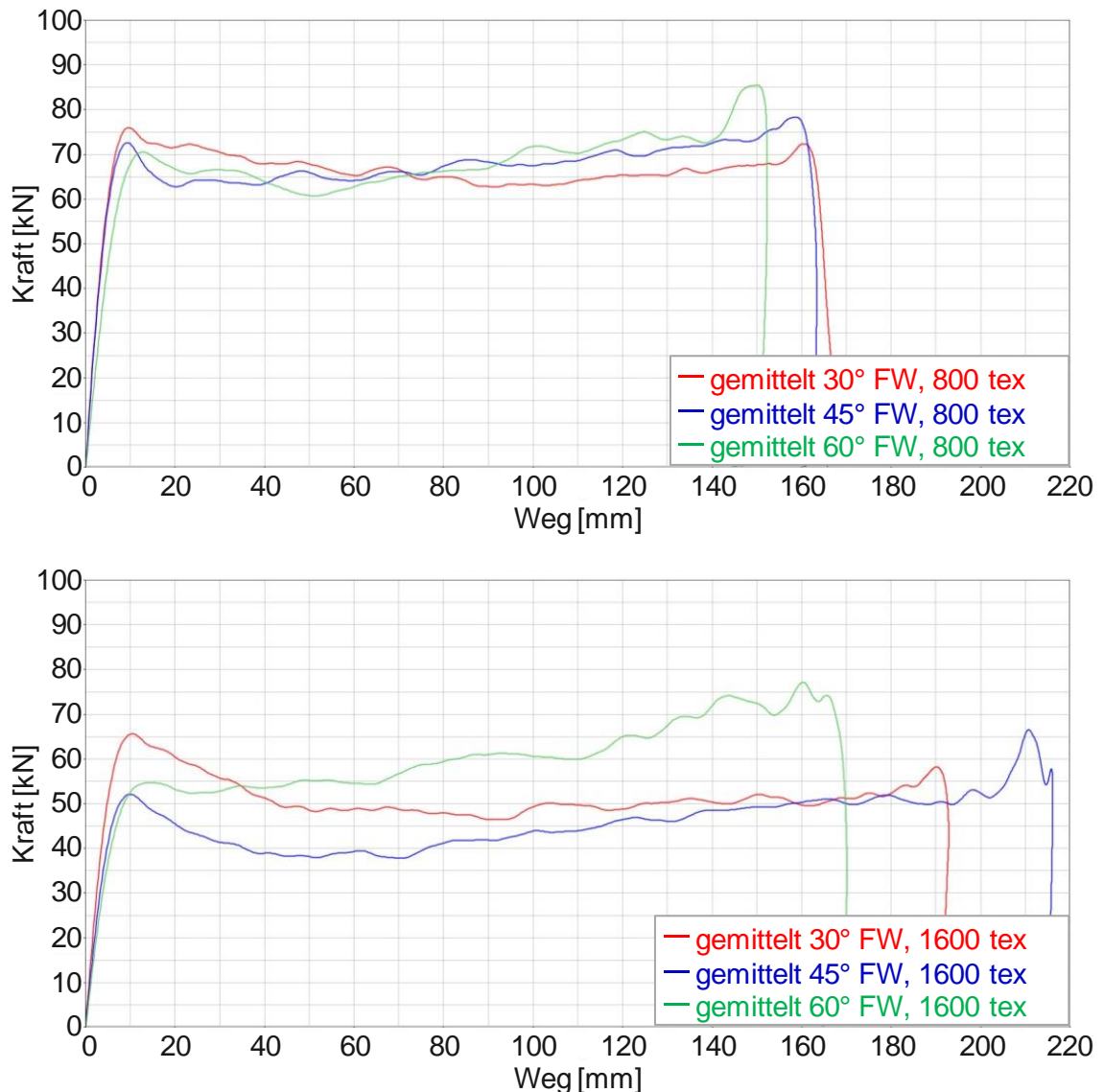


Abbildung 4: Ergebnisse der Fallturmversuche

### Numerische Simulation

Das Ziel der numerischen Simulation war die Entwicklung eines Modellierungsansatzes, welcher für alle in diesem Projekt getesteten Geflechtvarianten geeignet ist. Für die Berechnungen wurde der Solver LS-Dyna benutzt. Dabei wurden zuerst Simulationsmodelle der quasi-statischen Prüfungen aufgebaut. Die Modelle beinhalten alle relevanten Prüfrandbedingungen und Materialmodelle basierend auf gemessenen Materialparametern. Darauf aufbauend wurde unter Verwendung der erstellten Materialmodelle ein Simulationsmodell für die dynamischen Fallturmversuche aufgestellt. Mit diesen Simulationsmodellen wurde eine Kalibrierung der Solver-Eingangsgrößen vorgenommen, die nicht direkt aus den Versuchen abgeleitet werden konnten. Die Eingangsgrößen wurden durch iterativen Vergleich mit den Realversuchen bestimmt. So konnte für jede Geflechtvariante ein Simulationsansatz entwickelt werden, welcher eine hohe Simulationsgenauigkeit in quasi-statischen und dynamischen Versuchen erlaubt.

Der Modellierungsansatz ist nachfolgend dargestellt: Jede Geflechtlage wird über eine Lage Shell-Elemente abgebildet, wobei die einzelnen Geflechtlagen kongruent zueinander vernetzt sind. Innerhalb einer Lage Shell-Elemente sind zwei Integrationspunkte definiert, einer für den positiven Flechtwinkel und einer für den negativen Flechtwinkel. Zur Abbildung geflochtener Strukturen wurden die Materialmodelle MAT\_058: LAMINATED\_COMPOSITE\_FABRIC, MAT\_261: LAMINATED\_FRACTURE\_DAIMLER\_PINHO und MAT\_262: LAMINATED\_FRACTURE\_DAIMLER\_CAMANHO verwendet. Dabei wurden die neuen Materialmodelle MAT\_261 und MAT\_262 auf ihre Tauglichkeit zur Abbildung der Materialeigenschaften von geflochtenen FVK-Crashstrukturen untersucht. Die Geflechtlagen sind über eine lösbare Kontaktverbindung miteinander verbunden, die eine Abbildung von Delamination ermöglicht. Abbildung 5 und 6 zeigen einen Vergleich zwischen den Ergebnissen des realen Fallturmversuchs und den Ergebnissen der Simulation. Analog zum Realversuch deformieren hier jeweils drei Geflechtlagen nach außen und drei nach innen.

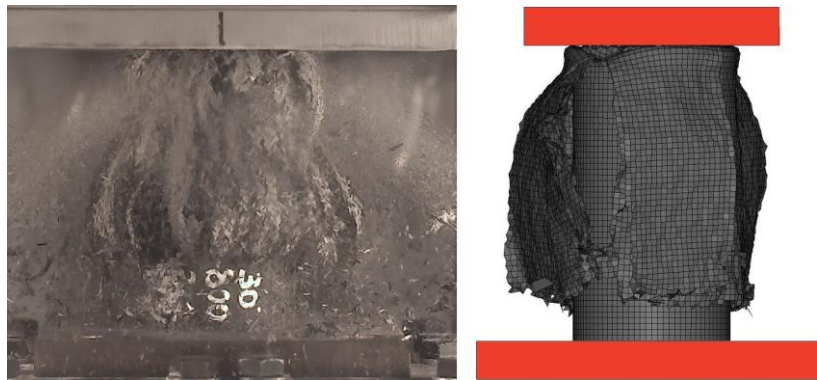


Abbildung 5: Deformationsverhalten von geflochtenen FVK-Crashstrukturen im Fallturmversuch und in der Simulation (30° Flechtwinkel, 800 tex)

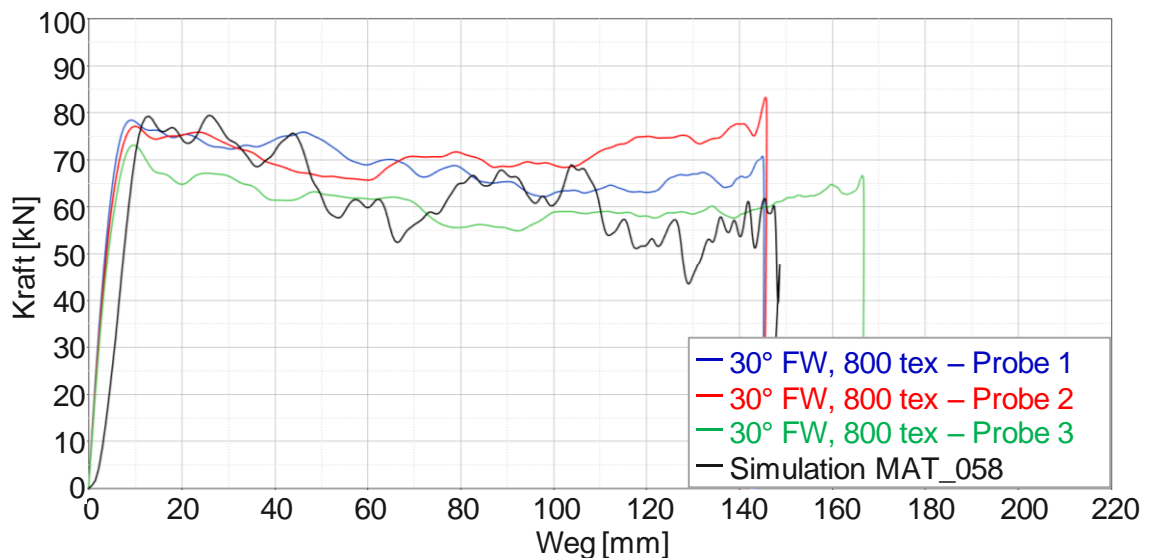


Abbildung 6: Simulationsergebnisse der geflochtenen FVK-Crashstrukturen im Fallturmversuch (30° Flechtwinkel, 800 tex)



## Fazit

Innerhalb des Projektes konnte das Verhalten crashbelasteter Strukturen aus textilverstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms unter Berücksichtigung grundlegender Werkstoffprüfungen beschrieben und dieses in der numerischen Simulation abgebildet werden.

Viele Prüfnormen, welche derzeit für Gewebe, Gelege und andere FVK-Strukturen verwendet werden, sind uneingeschränkt oder mit leichten Anpassungen für geflochtene FVK-Komponenten geeignet. Die Prüfnormen für Scherversuche und Delaminationsversuche erfordern jedoch noch eine nähere Betrachtung und Anpassung an geflochtene Prüfkörper.

Um rohrförmige geflochtene Prüfkörper quasi-statisch testen zu können, wurde eine Prüfmethode entwickelt. Dafür wurden zwei separate Spannvorrichtungen für Rohre konstruiert und gefertigt. Durch Kombination zu einer Spannvorrichtung können die Vorteile beider Vorrichtungen vereint werden. Es ist denkbar das Verfahren auch auf andere FVK-Strukturen zu übertragen, beispielsweise auf FVK aus Gewebe oder Gelege.

In Fallturmversuchen wurde das Energieabsorptionsverhalten der rohrförmigen Proben untersucht. Die Fallturmversuche zeigten, dass die Proben mit kleiner Faserfeinheit ein höheres Energieabsorptionsvermögen besitzen als die Proben mit großer Faserfeinheit. Gleiches wurde auch bei der Betrachtung unterschiedlicher Flechtwinkel deutlich. Auch hier zeigten die Proben mit kleinem Flechtwinkel ein höheres Energieabsorptionsvermögen.

Anhand der gewonnenen Werkstoffkennwerte aus den quasi-statischen und dynamischen Versuchen wurde ein Modellierungsansatz für alle in diesem Projekt betrachteten Geflechtvarianten entwickelt. Die numerische Simulation geflochtener FVK-Crashstrukturen konnte in dem Projekt verbessert werden. Vor allem die neuen Materialmodelle zeigten ihr Potenzial, das Materialverhalten von geflochtenen FVK-Crashstrukturen abzubilden. Somit konnte die Korrelation der Ergebnisse zwischen Simulation und Versuch erhöht werden. In weiteren Arbeiten sollte nun die Übertragbarkeit des Modellierungsansatzes auf andere Lastfälle detaillierter untersucht werden.

## Förderung

Das IGF-Vorhaben 467 ZN der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V. wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

**Zeitraum: 01.01.2013 - 30.09.2015**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Forschungsnetzwerk  
Mittelstand



## Literatur

1. Greve, L.; Pickett, A.; Payen, F.: Experimental testing and phenomenological modeling of the fragmentation process of braided carbon/epoxy composite tubes under axial and oblique impact, Composites Part B: Engineering, (Band 39), Amsterdam, 2008
2. Nageswara, R.; Chang, F.; Goldberg, K.; Roberts, G.; Jackson, K.: Crashworthiness of Composite Structures with Various Fiber Architectures, 11th International LS-DYNA User's Conference, Detroit, 2010
3. Xia, X: Modeling Energy Absorption with a Damage Mechanics Based Composite Material Model, SAGE Publications, 2009
4. Drechsler, K.: Zukunftspotential Carbonfaser Verbundwerkstoffe für den Leichtbau, 11. Jahrestag Zulieferer Innovativ, Ingolstadt, 2009
5. Schweizerhof, K., Weimar, K., Münz, T.; Rottner, T.: Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material Models in LS-DYNA – Merit and Limits, 5th International LS-DYNA User's Conference, Southfield, 1998
6. Döll, J.; Feindler, N.: Challenges in the Simulation of Car Body Structures made from Composite Materials, NAFEMS Seminar “Progress in Simulation Composites”, Wiesbaden, 2011
7. Holzapfel, M; Kopp, G.: Numerische Nachbildung der Crashfront von faserverstärkten Strukturen mit Hilfe von Mehrschalenmodellen, 6. LS-DYNA Anwenderforum, Franckenenthal, 2007
8. Matheis, R.; Kuckhoff, B.; Eckstein, L.; Gries, T.: Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashesabsorbern aus textilverstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation. FAT-Schriftenreihe 246, 2013, <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/fat-schriftenreihe-246.html>. Zuletzt geprüft am: 04.09.2013.