

Mechanische Charakterisierung von FVK-Rohren

Vergleich unterschiedlicher Faserverbundtechnologien

Martin Welsch & Ralph Funck
CirComp GmbH
Marie-Curie-Str.11
67661 Kaiserslautern, Germany
www.circomp.de

Kurzfassung— Die vorliegende Veröffentlichung befasst sich mit der mechanischen Charakterisierung von Rohrkörpern, die in unterschiedlichen Faserverbund-Herstellungstechnologien gefertigt wurden. Es wurden sowohl Rohre mit hohen UD- als auch Rohre mit hohen Torsionseigenschaften in unterschiedlichen Fertigungstechnologien bei verschiedenen Herstellern gefertigt und vergleichend untersucht. Die im Nasswickelverfahren hergestellten Rohrkörper zeigen dabei die besten Zug-, Druck- und Torsionseigenschaften.

Schlagworte— Faserverbund, CFK, Stabilisator, FVK-Rohrkörper, Hohlprofil, FilaWin®, Ondulation, Heavy Tow Roving

I. EINLEITUNG

Im Rahmen des Projektes wurde sich thematisch mit der Herstellung dickwandiger Faserverbund Hohlprofile für den Einsatz in der automobilen Großserie beschäftigt. Hierbei sollte in Zusammenarbeit mit verschiedenen Profilverstellern der eigentliche Profilverstellungsprozess derart optimiert werden, dass einerseits die mechanischen Eigenschaften, andererseits aber auch die Wirtschaftlichkeit des Prozesses gesteigert werden können [1]. Aufgrund von den exzellenten mechanischen Eigenschaften gewinnen Faserverbundwerkstoffe immer größeres Zukunftspotenzial als Leichtbauwerkstoff in der Automobilindustrie [2]. „Ein Höchstmaß an Ressourceneffizienz wird durch einen reduzierten Materialeinsatz bei optimaler Faserausnutzung (Faser möglichst in Lastrichtung gerichtet) und während des Betriebes des Fahrzeugs durch das reduzierte Gewicht erreicht“ [2].

Konkret behandelt das Projekt einen CFK-Stabilisator (wie er beispielsweise in dem Patent [3] beschrieben wird) für die automobilen Großserie (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Fahrwerksstabilisator als fahrdynamisches Bauteil zur Beeinflussung von Wank- und Einlenkverhalten des Fahrzeuges (Quelle: Audi AG)

II. ANGEWANDTE FERTIGUNGSVERFAHREN

Zur Herstellung von Faserverbundkunststoff-Hohlprofilen (FVK-Hohlprofile) werden folgende Fertigungsverfahren untersucht:

1. *Duroplast-Nasswickeltechnik*: Hierbei wird die CirComp FilaWin®-Technologie angewandt. Als Materialien kommen Rovings (50k Heavy-Tows und 12k Rovings) in Kombination mit Epoxidharz zum Einsatz.
2. *Gelege (NCF) mit Duroplast-RTM (Resin Transfer Moulding)*: Als Materialien werden trockenes Gelege (12k Fasern) und Epoxidharz verwendet.
3. *Flechten mit Duroplast-RTM*: Als Materialien werden trockene Rovings (12k Rovings) und Epoxidharz verarbeitet.
4. *Duroplast-Prepreg-Wickeln*: Bei diesem Prozess werden Prepreg Halbzeuge mit Epoxidharz verwendet (50k Heavy-Tows). Dabei wird z.B. eine Prepreg Gewebematte um einen Stahldorn gewickelt.
5. *Duroplast-Pultrusion*: Mit dem Pultrusionsverfahren und dem vorhandenen Anlagenkonzept konnten keine dickwandigen Hohlprofile in ausreichender Qualität hergestellt werden.

6. *Thermoplast-Wickeltechnik* (AFP-Prozess; *Automated fibre placement*): Für die Herstellung wurden 50k Halbzeuge (Tapes) verwendet.

Abbildung 2 zeigt die Fertigungsverfahren entsprechend der obigen Auflistung.

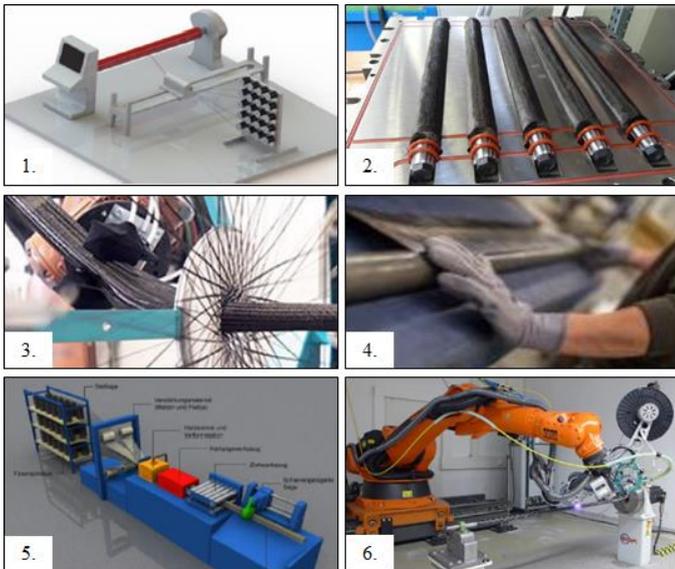


Abbildung 2: Darstellung der sechs Fertigungsverfahren (1. Nasswickeltechnik, 2. Gelege mit RTM, 3. Flechten mit RTM, 4. Prepreg-Wickeln, 5. Pultrusion und 6. Thermoplast-Wickeltechnik) [4]

Ursprünglich sollte jedes Fertigungsverfahren 50k Heavy-Tows verarbeiten, mit dem Ziel die Materialkosten zu senken und die Durchsatzrate zu erhöhen. Jedoch konnte dies aus fertigungstechnischer Sicht nicht in jeder Technologie umgesetzt werden. Des Weiteren befanden sich zu jenem Zeitpunkt die Verfahren Thermoplast-Wickeltechnik und Gelege mit RTM im Versuchsstadium [4].

III. VERSUCHSKÖRPER

Für die mechanische Bewertung der FVK-Hohlprofile werden Rohrprobekörper mit einer Länge von 350mm, einem Innendurchmesser von 30mm und einem Außendurchmesser von 37,75mm gefertigt. Jede Technologie stellt Probekörper mit einem Lagenaufbau von 0° (maximale UD-Eigenschaften) und einem Lagenaufbau von 45° (maximale Torsionseigenschaften) her. In Abbildung 3 sind exemplarisch 50k Probekörper mit einem $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau dargestellt (hergestellt in der FilaWin[®]-Technologie).



Abbildung 3: FilaWin[®] 50k Probekörper mit einem $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau

Für die CFK-Stabilisatoren werden Prototypen in der Nasswickeltechnik, Prepregwickeltechnik und Flechten mit RTM produziert. Die Lagenaufbauten sind herstellerspezifisch, wobei folgende Eigenschaften an den Stabilisator gestellt werden [1]:

- Länge 1003,5mm
- Max. Außendurchmesser $D_{\max} = 37,75\text{mm}$
- Mindestbiegesteifigkeit $EI > 3,6 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$
- Mindesttorsionssteifigkeit $GI_T > 3,8 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$
- Minimales Gewicht

IV. VERSUCHE

Im ersten Schritt werden die Profile hinsichtlich ihres Faservolumengehaltes bewertet. Dafür wird entweder die bildanalytische Methode, die Veraschung oder die Dichtemethode angewandt.

Zur mechanischen Charakterisierung der 350mm Profile werden u.a. Zug-/ Druck- und Torsionsprüfungen unter Raumtemperatur (RT, 23°C) und 80°C (Hochtemperatur, HT) durchgeführt. Für die Versuche unter erhöhter Temperatur werden die Profile mit einer außenliegenden Silikonheizmatte ausgestattet. Die Aufheizdauer auf 80°C beträgt 10min.

Die Profile mit den maximalen UD-Eigenschaften werden für die Zug- und Druckprüfung verwendet und die Profile mit den maximalen Torsionseigenschaften (45°) werden für die Torsionsprüfung verwendet.

Die Zug-Druckprüfung wird mittels einer Zwick Z1200 durchgeführt (siehe Abbildung 4). Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 5 mm/min für die RT Prüfung und 2 mm/min für die HT Prüfung (80°C). Die Dehnung wird durch einen Extensometer bestimmt. In beiden Fällen wird eine Vorkraft von 500N gewählt. Zur Berechnung der Steifigkeiten werden die Dehnungsintervalle von 0,05% bzw. -0,05% und 0,1% bzw. -0,1% (Zug- bzw. Drucksteifigkeit) genutzt [1].

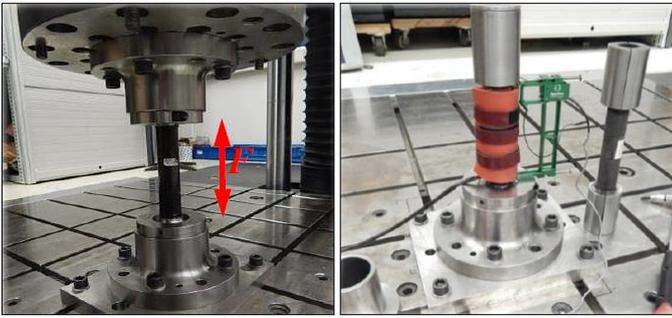


Abbildung 4: Versuchsaufbau Zug-/ Druckprüfung (links RT, rechts HT mit 80°C) [4]

Die Lasteinleitung wird durch einen Reibschluss über einen Querpressverband mit Stahldopplern realisiert. Die CFK-Rohre werden in der Lasteinleitung innenseitig durch einen Stahldorn gestützt [1].

Die Torsionsprüfung wird an einem von der Universität der Bundeswehr München entwickelten Torsionsprüfstand durchgeführt.

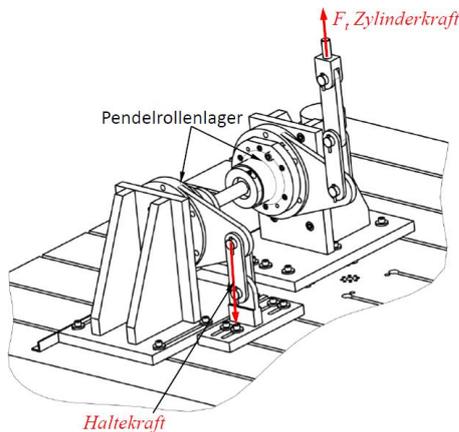


Abbildung 5: Torsionsprüfstand [5]

Durch eine beidseitig gelenkige Lagerung der Prüfkörper werden keine Querkräfte und Biegemomente in das Rohr eingeleitet. Die Verdrillung der Rohre wird mittels DMS und/oder Extensometer bestimmt. Die Lasteinleitung wird durch einen Reibschluss über einen Querpressverband mit geklebten Stahldopplern realisiert. Die CFK-Rohre werden in der Lasteinleitung innenseitig durch einen Stahldorn gestützt [6].

Für die CFK-Stabilisatoren werden u.a. folgende Prüfungen durchgeführt:

- Quasistatische Torsionsprüfung am Rohr bei RT und HT (80°C); drehwinkelgeregelt mit 5°/min (Lasteinleitung über Innendorn und zwei verzahnte Halbschalen, die geklemmt werden)
- Quasistatische Torsionsprüfung an der Baugruppe mit Aluminiumschenkel (vgl. Abbildung 1) bis zum Bruch bei RT und HT (80°); weggeregelt mit 20mm/min

Die Prüfungen unter erhöhter Temperatur finden in einer Temperierkammer statt.

V. VERSUCHSERGEBNISSE

Die Versuche hinsichtlich des Faservolumengehaltes der 0° bzw. 5° und 45° Profilen ergibt folgende Werte:

TABELLE 1: FASERVOLUMENGEHÄLTEN DER VERSCHIEDENEN HERSTELLUNGSTECHNOLOGIEN AN ROHRPORBEKÖRPERN [4]

Technologie	Faservolumengehalt für max. UD Lagenaufbau (0° bzw. 5°) [%]	Faservolumengehalt für max. torsionssteifen Lagenaufbau (45°) [%]
FilaWin® (50k)	61,8*	48,6
Gelege mit RTM	44,5	45,6
Flechten mit RTM	42,7*	53,3
Prepregwickeln	39,9	40,5
Thermoplastwickeln	49,0	49,0

*Lagenaufbau 5°

Im Mittel wurden mit der FilaWin®-Technologie die höchsten Faservolumengehalte realisiert.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen dargelegt:

A. Zug-/ Druckprüfung der Probekörper mit maximalen UD-Eigenschaften

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche.

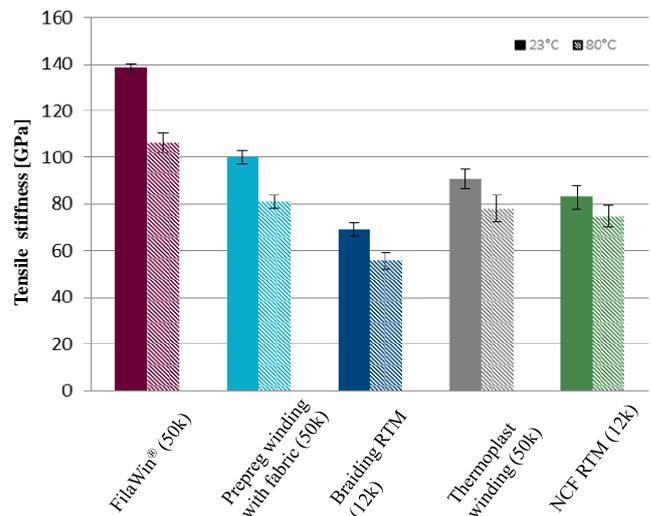


Abbildung 6: Zugsteifigkeit der Probekörper mit max. UD Eigenschaften (0° bzw. 5°) [4]

Generell führt die Prüfung unter höherer Temperatur zu geringeren Steifigkeitswerten [1].

Die höchste Zugsteifigkeit wird mittels FilaWin®-Technologie hergestellter Bauteile erreicht.

Abbildung 7 stellt die Ergebnisse der Druckversuche dar.

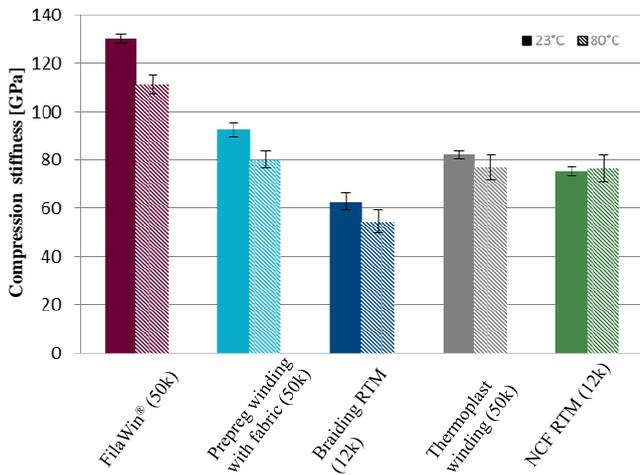


Abbildung 7: Drucksteifigkeit der Probekörper mit max. UD Eigenschaften (0° bzw. 5°) [4]

In diesem Fall liegt die Steifigkeitsabnahme bei 80°C niedriger [1]. Sowohl für die Zug- als auch für die Drucksteifigkeit erzielen die in FilaWin®-Technologie gefertigten Probekörper die höchsten Werte.

B. Torsionsprüfung der 45° Probekörper

Abbildung 8 zeigt die Untersuchung der Torsionssteifigkeit.

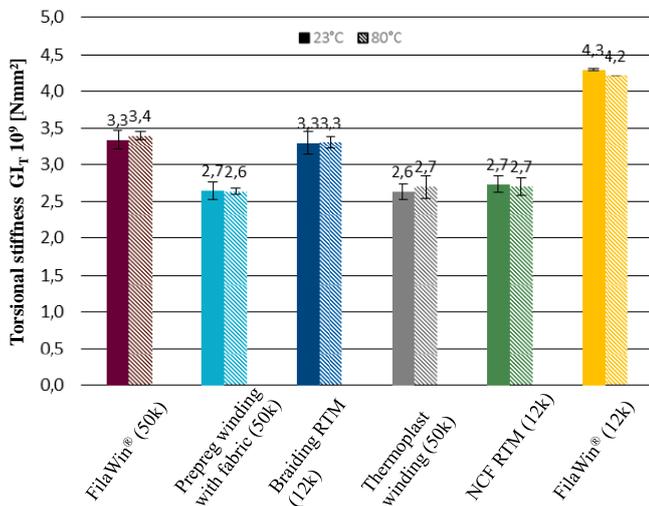


Abbildung 8: Torsionssteifigkeit der 45° Probekörper [4]

Die Ergebnisse zeigen, dass die erhöhte Temperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Torsionssteifigkeit hat. Des Weiteren ist ersichtlich, dass durch die Verwendung einer 12k Faser deutlich höhere Steifigkeiten (besonders in der FilaWin®-Technologie) erreicht werden. Dies lässt sich u.a. dadurch erklären, dass sich durch den Einsatz von 12k Rovings Ondulationen im Bauteil reduzieren [1].

Abbildung 9 stellt die Ergebnisse der Bruchuntersuchung unter Torsionsbelastung dar.

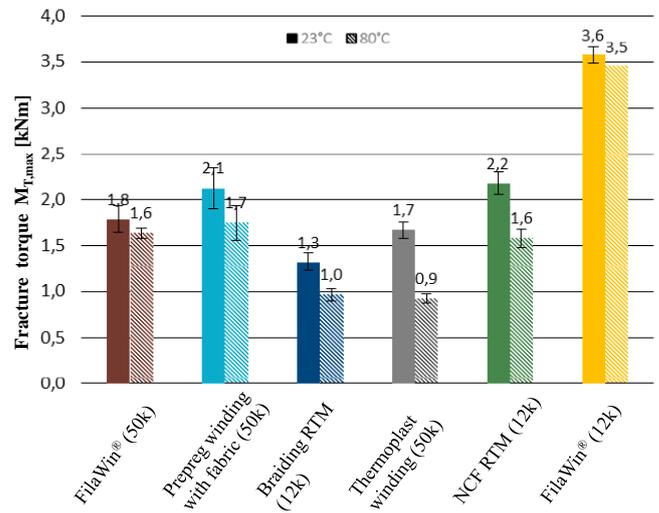


Abbildung 9: Bruchtorsionsmoment der 45° Probekörper [4]

Die 12k in FilaWin®-Technologie gefertigten Probekörper zeigen deutlich höhere Bruchtorsionsmoment als die Probekörper der restlichen Herstellungsverfahren.

Die Bruchuntersuchung zeigt, dass der Temperatureinfluss im Gegensatz zur Steifigkeitsuntersuchung nicht vernachlässigbar ist. Die Bruchmomente reduzieren sich unter Temperatur um ca. 10-20% [1].

C. Torsionsprüfung der CFK-Stabilisator-Rohre

Abbildung 10 zeigt die Untersuchung der Torsionssteifigkeit der Stabilisator-Rohre.

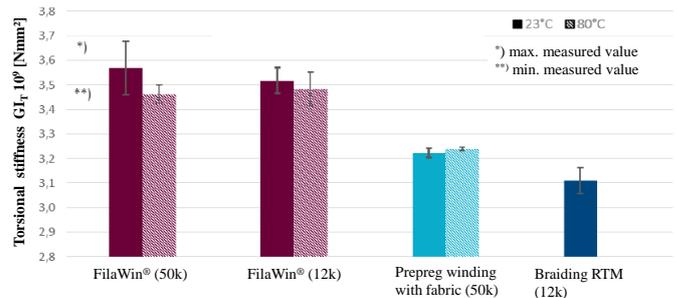


Abbildung 10: Torsionssteifigkeit der CFK-Stabilisator-Rohre [4]

Ähnlich wie die Prüfungen der 45° Probekörper zeigen auch die Ergebnisse der Stabilisator-Rohre, dass in der FilaWin®-Technologie die höchsten Steifigkeiten erreicht werden. Im Unterschied zu den Probekörpern kann für die Stabilisatoren kein signifikanter Unterschied zwischen 50k und 12k festgestellt werden [1].

D. Bruchuntersuchung der CFK-Stabilisator-Baugruppe

Abbildung 11 zeigt die Bruchuntersuchung der CFK-Stabilisator-Baugruppe bei 80°C.

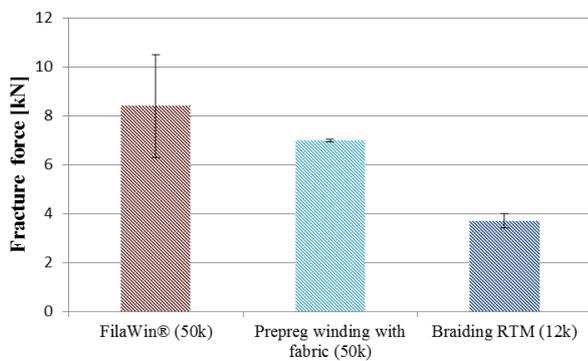


Abbildung 11: Bruchkraft der CFK-Stabilisator-Baugruppe bei 80°C [1]

Die Ergebnisse zeigen, dass die in FilaWin®-Technologie gefertigten Stabilisatoren bei 80°C im Vergleich zu den anderen Technologien die höchste Bruchlast erreicht.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes findet eine mechanische Charakterisierung von Hohlprofilen, die in unterschiedlichen Faserverbund-Herstellungsverfahren hergestellt werden, statt. Dabei wurden folgende Technologien untersucht: FilaWin®-Technologie, Gelege mit RTM, Flechten mit RTM, Prepregwickeln mit Gewebematten und Thermoplastwickeln. Die Profile wurden u.a. Zug-, Druck- und Torsionsprüfungen unterzogen. Im Wesentlichen konnte erarbeitet werden, dass Profile, die in FilaWin®-Technologie hergestellt wurden, mit die besten Ergebnisse sowohl in Zug-, Druck- als auch in Torsionssteifigkeit liefern. Des Weiteren wurde festgestellt, dass durch Einsatz von 50k Fasern reduzierte mechanische Eigenschaften gemessen werden. Durch die Verwendung einer 12k Faser in der FilaWin®-Faserwickeltechnologie konnte beispielsweise eine 23% höhere Torsionssteifigkeit und ein 50% höheres Torsionsbruchmoment im Vergleich zu der Verwendung einer 50k Faser in der FilaWin®-Faserwickeltechnologie erreicht werden. Das Gesamtergebnis zeigt, dass FilaWin®-Technologie u.a. zu höheren mechanischen Eigenschaften der Rohre führt und eine geeignete Herstellungstechnologie für derartige FVK-Rohranwendungen darstellt.

LITERATUR

- [1] O. Stoll – MAI Profil Abschlussbericht AUDI AG; MAI CARBON; 2017
- [2] VDI ZRE Publikations: Kurzanalyse Nr. 3 – Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien; VDI Zentrum Ressourceneffizienz, März 2013
- [3] S. Schindler, C. Lacher, C. Hahne, G. Fessel, C. Bschieler, U. Knaust und H. Reim – „Stabilisator für ein Kraftfahrzeug“. Deutschland Patent DE 10 2012 008 995 A1, 04. 05. 2012.
- [4] O. Stoll, F. Brandmayr – MAI Profil; MAI CARBON Ergebniskonferenz, Augsburg, Juli 2017
- [5] F. Brandmyr, R. Thomas, H. Rapp – Hochbeanspruchte CFK-Torsionsrohre in verschiedenen Fertigungsverfahren – Test und Versagensformen; Universität der Bundeswehr München; Fachtagung Carbon Composites, Augsburg, Dezember 2015
- [6] F. Brandmyr, B. Balcerzak, O. Stoll, H. Rapp – Zum Einfluss von Fertigungsverfahren auf Festigkeit und Steifigkeit von CFK-Torsionsrohren, Universität der Bundeswehr München; 8. Landshuter Leichtbau-Colloquium, März 2017