

Neuartige monolithische Seilendverbindung für hochmodulare Faserseile

Novel monolithic rope termination for high-modulus fibre ropes

Sven Winter
Martin Wehr

*Abteilung Seiltechnologie
Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)
Universität Stuttgart*

Im Rahmen der Forschergruppe wird am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) an hochfesten Faserseilen mit integrierten kraftmessenden Sensoren und einer völlig neuen Seilendverbindung geforscht. Die Faserseile werden bei der Verseilung mit kapazitiven oder resistiven Garnsensoren ausgestattet, die bei der Konfektionierung der Endverbindungen an die Messelektronik angeschlossen werden können. Zur Übertragung höchster Zugkräfte wird dazu am IFT eine neuartige monolithische Endverbindung für Faserseile entwickelt, welche auch bei dauerschwellender Belastung sicher die auftretenden Zugkräfte übertragen kann.

[Schlüsselwörter: hochmodulare Faserseile, Seilzugglieder, monolithische Seilendverbindung, sensorisches Seil]

Within the framework of a researcher group at the Institute of Mechanical handling and Logistics it is being quested on high strength fibre ropes with integrated force measuring sensors and a completely new rope termination. During the closing process the fibre ropes are equipped with capacitive or resistive yarn sensors, which can be connected with the measuring electronic during the process of assembling of the rope termination. For transmission of highest tensile force a novel monolithic termination for fibre ropes is being developed which can also transfer the occurring tensile force during tension-tension stress in a safe way.

[Keywords: high strength fibre ropes, tension member, monolithic termination, sensory rope]

1 EINFÜHRUNG

Auf Initiative des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT) wurde an der Universität Stuttgart im Juni 2009 eine Forschergruppe ins Leben gerufen, welcher sieben verschiedene Institute aus vier Fakultäten der Universität Stuttgart angehören. Die Forschergruppe befasst sich mit der Erforschung „Hybrider Intelligenter Konstruktionselemente“ (HIKE), welche durch ihren hybriden Aufbau aus Komponenten, welche eine mechanische Aufgabe

übernehmen, sowie aus Sensoren, Aktoren und Komponenten der Steuerungs- und Regelungstechnik, neue, höherwertige Aufgaben übernehmen sollen, welche mit konventionellen Konstruktionselementen nur durch die Kombination vieler Einzelkomponenten möglich wären. Die Forschergruppe wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) in der ersten Förderphase bis Mai 2012 mit ca. 1,9 Mio. Euro und seit November 2013 bis Oktober 2015 in der zweiten Förderphase noch einmal mit ca. 2,2 Mio. Euro gefördert [Weh16].

Bei einem traditionellen Konstruktionsprozess wird durch die Kombination unterschiedlicher genormter oder nach vorgegebenen Richtlinien individuell entworfener Konstruktionselemente zunächst eine Baugruppe erstellt, welche eine bestimmte mechanische Funktion erfüllt. Anschließend kann diese Baugruppe durch die Erweiterung mit Sensoren, Aktoren und Komponenten der Steuerungs- und Regelungstechnik erweitert werden, um z.B. Betriebszustände zu überwachen oder auf äußere Impulse reagieren zu können.

Nach dem Ansatz der HIKE-Forschergruppe sollen nun neue hybride Konstruktionselemente entstehen, welche aus sich selbst heraus mechanische, sensorische und aktorische Funktionen erfüllen können. Ermöglicht werden soll dies durch einen hybriden Werkstoffaufbau, indem beispielsweise Sensorfasern sowohl zur Zustandserfassung abgefragt werden können [FiW11], als auch durch ihre mechanische Struktur und Anordnung im Konstruktionselement zur Übertragung von Kräften beitragen können.

Das Forschungsprojekt soll dabei zeigen, dass durch die Kombination neuartiger hybrider intelligenter Konstruktionselemente „einfache“ Maschinen mit komplexen Fähigkeiten aufgebaut werden können.

2 HYBRIDE INTELLIGENTE ZUELEMENTE AUS HOCHMODULAREN FASERSEILEN

Im Rahmen der Forschergruppe HIKE werden am IFT hochmodulare Faserseile aus synthetischen Fasern

mit sensorischen und aktorischen Fähigkeiten untersucht. Parallel dazu wird der Größeneinfluss mit wachsendem Seildurchmesser untersucht.

2.1 ENTWICKLUNG EINER NEUEN ENDVERBINDUNG FÜR HOCHMODULARE FASERSEILE

Bei der Evaluation der möglichen Endverbindungen [McK04], [Str14] für hochfeste Faserseile wurde festgestellt, dass die Anforderungen an HIKE-Zugelemente (Zugkraftübertragung bis 90 % der Mindestbruchkraft, Dauerschwellfestigkeit) mit herkömmlichen Endverbindungen nicht erfüllt werden können.

Daher wurden am IFT neue Endverbindungen für Faserseile in Form eines mit Kunstharz vergossenen Auges entwickelt. Diese monolithische Endverbindung zeichnet sich durch ein niedriges Gewicht, eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen schwellende Belastungen sowie durch die Übertragung hoher relativer Bruchkräfte (ermittelte Bruchkraft bezogen auf Mindestbruchkraft der Seile) aus. Die Entwicklung erfolgte dabei in verschiedenen Schritten (Generationen), bei denen kontinuierlich die übertragbare Bruchkraft gesteigert werden konnte [Fin11], [Fin15]. In Abbildung 1 sind die erreichten relativen Bruchkräfte der einzelnen Entwicklungsgenerationen dargestellt. Seit der 4. Generation wurde bei Faserseilen mit einem Durchmesser von $d = 4 \dots 14$ mm regelmäßig die Mindestbruchkraft der Faserseile erreicht. Gleichzeitig widerstanden die Endverbindungen der 4. und 5. Generation bei zugschwellender Belastung jeweils mehr als zwei Millionen Schwingspiele zwischen 15 % und 30 % der Mindestbruchkraft der Faserseile ohne äußere Anzeichen von Beschädigungen.

Zugversuche: Verhältnis aus wirklicher Bruchkraft F_w zur Mindestbruchlast MBL des Seiles

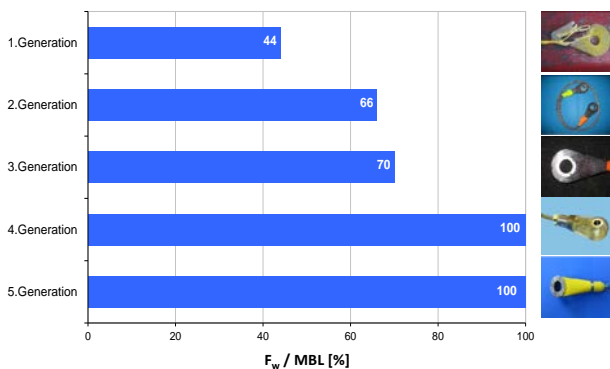


Abbildung 1. Ergebnisse der Zugversuche mit Endverbindungen der Generationen 1 bis 5

Um neue Anwendungsfelder für die hybriden intelligenten Zugelemente z.B. im Bereich Offshore oder Krane erschließen zu können, wurde in der zweiten Förderphase der Seilgrößeneinfluss bis auf einen Seildurchmesser von 96 mm erweitert. Hierbei wurden Softwareberechnungsverfahren zur Auslegung und anschließenden Parametrisierten Vergussformoptimierung am IFT entwickelt. Da-

bei wurden neue Vergussformen für die Seildurchmesser 16 mm, 26 mm, 50 mm und 96 mm inklusive einem 11 m hohen Vergussturm realisiert. Bei den Untersuchungen waren außer den Durchmessern weitere Parameter wie Seilkonstruktionen, Fasercoating, Einlegetechnik und das Polyurethan zur Fixierung der Fasern im Forschungsprogramm enthalten. Zum Abschluss des Forschungsprogrammes konnte bei allen Seildurchmessern, außer bei 50 mm, eine 100 % Seilbruchkraftübertragung erzielt werden (vgl. Abbildung 2).

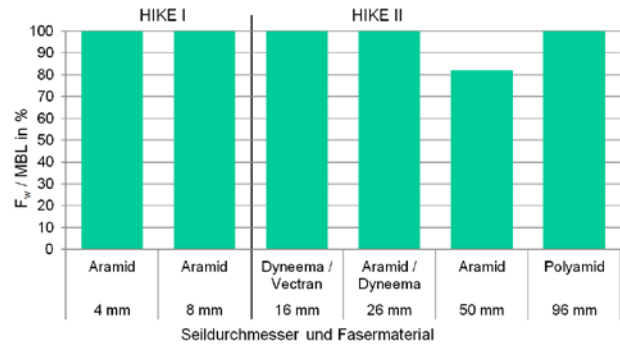


Abbildung 2. Zugversuchergebnisse der monolithischen Seilendverbindungen

2.2 INTEGRATION VON GARNSENSOREN IN DIE HOCHMODULAREN FASERSEILE

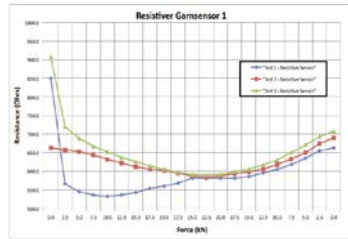
Zur Realisierung der sensorischen Funktionen der hochmodularen HIKE-Faserseile wurden Versuche mit kapazitiven und resistiven Garnsensoren auf der freien Seillänge durchgeführt. Darüber hinaus wurden Dehnungsmessstreifen (DMS) bei der Herstellung der Endverbindungen mit eingegossen. Die verwendeten Garnsensoren wurden in einem weiteren Teilprojekt der Forschergruppe vom Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf (ITV) erforscht und für die Verwendung im hochmodularen Faserseil bereitgestellt. Abbildung 3 zeigt ein Faserseilzugglied im Durchmesser $d = 4$ mm, welches in einem gemeinsamen Demonstrator der Forschergruppe Verwendung findet.



Abbildung 3. Sensorisches Hochfestes Faserseilzugglied

In Abbildung 4 sind Messkurven der verschiedenen Sensorkonzepte dargestellt. Bei den Messungen mit Dehnungsmessstreifen wurde zusätzlich die Anordnung der DMS in der Endverbindung variiert.

resistives Sensorgarn:
 Funktionsfähigkeit und
 Reproduzierbarkeit gegeben



kapazitives Sensorgarn:
 Funktionsfähigkeit gegeben,
 Dauerversuche laufen



DMS Sensor
 Funktionsfähigkeit und
 Reproduzierbarkeit gegeben

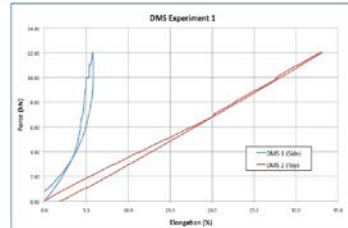


Abbildung 4. Messergebnisse mit verschiedenen Sensor-konzepten

Anhand der Ergebnisse ist das gute Potential von direkt integrierten Sensoren im Seilzugglied deutlich erkennbar.

2.3 INTEGRATION AKTORISCHER FUNKTIONEN IN HOCHMODULAREN FASERSEILEN

In der laufenden zweiten Förderphase der Forschergruppe wird die Integration von aktorischen Funktionen in die HIKE-Konstruktionselemente angestrebt. Dazu wird am IFT das Ziel verfolgt, den Flechtwinkel der Faserseile gezielt zu beeinflussen, um dadurch eine Veränderung der Seillänge herbeizuführen. In Abbildung 5. ist das Prinzip der Längenänderung dargestellt.

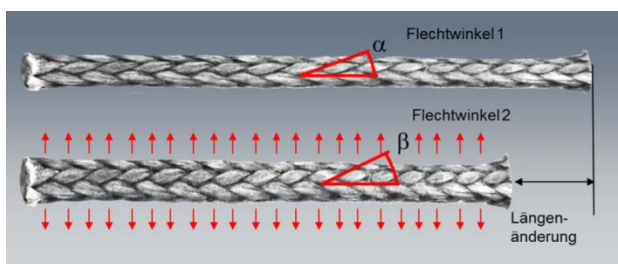


Abbildung 5. Änderung der Seillänge durch Veränderung des Flechtwinkels

Die Versuchsseile werden dabei auf der gesamten Länge mit einem innen liegenden flexiblen Schlauch ausgestattet, welcher bei der Herstellung der Endverbindungen im Inneren der Endverbindung angeschlossen werden kann. Die Anschlussstelle wird dadurch optimal vor Umgebungseinflüssen geschützt. Durch die Beaufschlagung

des Schlauches mit Innendruck dehnt sich dieser aus und bewirkt damit eine Veränderung des Flechtwinkels, vgl. Abbildung 6.

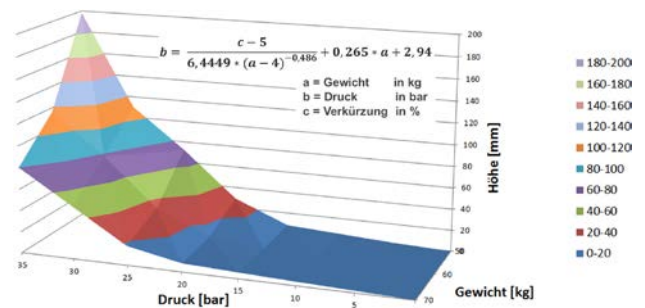


Abbildung 6. Messgröße aktorisches Zugglied

Aus den Messergebnissen wurde mittels Regression eine Gleichung zur Bestimmung des Druckes unter den Eingangsgrößen Seilkraft (Gewicht) und Verkürzung des Seiles erarbeitet. Bei diesem Versuch konnten Seillängenänderungen bis 7 % mit Erfolg realisiert werden.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Forschergruppe HIKE wurden am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart Untersuchungen an hochmodularen Faserseilen mit hybridem Aufbau durchgeführt. Die Faserseile wurden auf der gesamten Seillänge mit resistiven und kapazitiven Garnsensoren ausgestattet. Zur sicheren Übertragung von Zugkräften bis zur vollen Seilbruchkraft wurde eine neue monolithische Endverbindung auf Basis eines mit Kunstharz vergossenen Auges entwickelt. In Zugversuchen im Durchmesserbereich der Seile von $d = 4 \dots 96$ mm wurde zum Großteil die Mindestbruchkraft der Seile erreicht. In Zugschwellversuchen wurden zwei Mio. Lastwechsel zwischen 15 % und 30 % der Mindestbruchkraft der Seile ohne äußerlich sichtbare Beschädigungen der Seile oder Endverbindungen erreicht. Bei Versuchen mit hochmodularen Faserseilen im Durchmesser bis 50 mm werden derzeit ca. 80 % der Mindestbruchkraft der Seile erreicht.

Mittlerweile gibt es erste Prototypen von laufenden hochmodularen Seilen mit der monolithischen Endverbindung und integrierter permanenter Lastmessung, die die Basis für die Serienentwicklung darstellen. Ferner ist derzeit ebenso ein Projekt am Laufen bei dem hochmodulare Faserseilzugglieder mit jeweils 2 monolithischen Seilendverbindungen und integrierter Lastmessung als Abspannungselement für den permanenten Außeneinsatz erprobt wird. Da die Forschungsergebnisse und die bisherigen Ergebnisse der oben genannten Prototypen sehr erfolgreich und vielversprechend sind ist das IFT gemeinsam mit einem Industriepartner derzeit an der Beantragung eines DFG-Transferprojektes zu diesem Thema.

LITERATUR

- [Fin11] Finckh-Jung, Anita; Winter, Sven; Wehking, Karl-Heinz: *Development and Research of a new Termination for high-tensile Fiber Ropes*. Tagungsband zur OIPEEC - Konferenz (organisation internationale pour l'étude de l'endurance des cables) College Station, Texas (USA), 22. – 24. März 2011, 1995 – ISBN 978-0-9552500-3-3
- [FiW11] Finckh-Jung, Anita; Winter, Sven: *Intelligent Fibre Ropes with new high-tensile Terminations*. IFAC - International Fibre Application Conference; Antwerpen, Belgien; 29. – 30. 11. 2011
- [Fin15] Finckh-Jung, Anita; Winter, Sven: *From 4 mm up to 50 mm rope diameter – Scaling up a new termination for high-modulus fibre ropes*. Tagungsband zur OIPEEC - Konferenz (organisation internationale pour l'étude de l'endurance des cables) Stuttgart, März 2015, 1995 – ISBN 978-0-9552500-5-7
- [McK04] McKenna, H. A.: *Handbook of fibre rope technology*. Chapter 7; CRC Press Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, 2004 – ISBN 1-85573-606-3
- [Str14] Streubel, Peter; Michael, Markus, Pfau, Anke; *Bionisch adaptierte Endverbindungen für textile Maschinenelemente*. Tagungsband 6. Fachkolloquium InnoZug, Innovative Anwendung von Hochleistungsfasern in der Fördertechnik, 23.-24.09.2014, Chemnitz
- [Weh16] Wehking, Karl-Heinz, Winter, Sven; Witte, Tobias; Finckh-Jung, Anita: *Entwicklung von steifen und biegeschlaffen Zugelementen und Krafteinleitungselementen für Flächenelemente*. Endbericht DFG-Forschungsvorhaben WE 2187/18-2, 2016
- Dipl.-Ing. Sven Winter**, akademischer Oberrat am Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart.
- Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart
- Telefon: +49 711 685-83787, Fax: +49 711 685-83769
E-Mail: sven.winter@ift.uni-stuttgart.de
- Dipl.-Ing. Martin Wehr**, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart.
- Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart
- Telefon: +49 711 685-83666, Fax: +49 711 685-83769
E-Mail: martin.wehr@ift.uni-stuttgart.de