

Synthetische Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung

Synthetic fibre ropes under high-dynamic stress

Martin Wehr

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) - Abteilung Seiltechnologie
Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
Universität Stuttgart

Moderne, hochfeste Faserseile finden heutzutage mehr und mehr Einzug in fördertechnischen Aufgaben. Grund hierfür ist vor allem die sehr geringe spezifische Masse bei gleichzeitig sehr großen Festigkeiten. Dies ermöglicht den Nutzern unter anderem die Überwindung großer Fördertiefen sowie die Realisierung hochdynamischer Vorgänge. Der Stand der Forschung hochfester Faserseile ist im Vergleich zu dem klassischer Stahlseile jedoch verhältnismäßig gering. So ist das Verschleiß- und Lebensdauerverhalten laufender Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung bislang vollkommen unerforscht. Dieser sicherheitstechnische Mangel wurde am Institut für Fördertechnik und Logistik erkannt und im Rahmen eines DFG-Forschungsprojekts erstmalig grundlegend beleuchtet.

[hochfeste Faserseile, hochdynamische Beanspruchung, Verschleiß, Lebensdauerverhalten]

MModern, high-strength fibre ropes are used more and more in mechanical handling applications. This is mainly due to the very low specific mass and, at the same time, to very high strengths. This allows the users to reach large production depths as well as the realization of highly dynamic processes. The state of research on high-strength fiber ropes is relatively low compared to classical steel ropes. Additionally the wear and durability of running fiber ropes under high-dynamic load is completely unexplored. This safety-related lack was recognized at the Institute for Materials Handling and Logistics and was fundamentally elucidated within the scope of a research project, financed by the German Research Foundation (DFG).

[high strength fibre ropes, high-dynamic behavior, lack in safety]

1 EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren werden in immer mehr Anwendungen Drahtseile durch hochmodulare Faserseile ersetzt.

Neben ihrer vergleichbar hohen Festigkeit weisen diese hochmodularen Faserseile enorme Vorteile in Bezug auf deren geringen Eigengewichts und der Möglichkeit zur Realisierung kleiner Biegeradien auf. Diese positiven Eigenschaften prädestinieren hochmodulare Faserseile für hochdynamische Anwendungen, wie sie in parallelkinematischen, seilbasierten Fördersystemen vorliegen. Am Stuttgarter Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) beschäftigt sich eine Forschergruppe um Junior-Prof. Dr.-Ing. A. Pott mit der Entwicklung sogenannter Seilroboter für unterschiedliche hochdynamische Anwendungen [1, 2]. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Seilroboters.

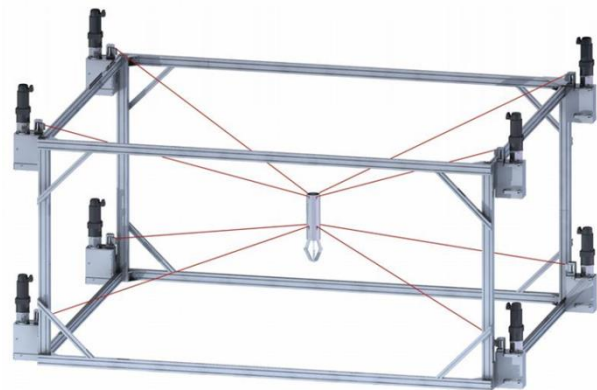


Abbildung 1. Prinzipieller Aufbau eines Seilroboters [5]

Da es sich bei der Erforschung hochmodularer Faserseile um ein sehr junges Forschungsgebiet handelt, besteht bislang jedoch ein großer Mangel an grundlagenorientierter Forschungsarbeit. Speziell hinsichtlich des Verhaltens hochmodularer Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung existieren bislang keinerlei Erkenntnisse, was den Einsatz dieser Seile, trotz ihrer großen Vorteile, bislang stark einschränkt [3].

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit dem Verhalten hochmodularer Faserseile unter hochdynamischer Beanspruchung und basiert auf dem grundlagen- und anwendungsorientierten Forschungsprojekt „Hochdynamische

Beanspruchung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seilkinematiken“ [4], das durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG Forschungsprojekt WE 2187/29-1) über 24 Monate gefördert wurde.

Ziele des Forschungsprojektes waren:

- Die Schaffung einer Möglichkeit zur Durchführung hochdynamischer Biegeversuche. Hierzu wurde ein neuartiger Groß-Versuchsstand konzipiert, konstruiert, erstellt und in Betrieb genommen. Mit diesem Versuchsstand ist es nun möglich hochdynamische Biegeversuche mit Geschwindigkeiten von bis zu $v = 10 \text{ m/s}$ und Beschleunigungen von bis zu $a = 100 \text{ m/s}^2$ durchzuführen. Alle Zwischenwerte können dabei stufenlos eingestellt werden;
- Erarbeitung einer Datenbasis, die auf experimentellen Untersuchungen beruht. Hierzu wurden Standard-Dauerbiegeversuche, Zug-Schwell-Versuche sowie hochdynamische Biegeversuche durchgeführt;
- Auswertung der Versuchsergebnisse, die aus den verschiedenen Versuchen erlangt werden konnten. Hieraus sollten die lebensdauerbeeinflussenden Parameter identifiziert und quantifiziert werden;
- Verifikation der gewonnenen Versuche in Referenzversuchen, um die Versuchsergebnisse weiter zu untermauern;
- Verknüpfung der Forschungsergebnisse mit der Praxis.

2 VERSUCHSSEILE

Zur Durchführung der verschiedenen Versuche wurden insgesamt 5 unterschiedliche Versuchsseile ausgewählt. Um möglichst viele unterschiedliche Parameter zu untersuchen wurden hierzu Seile aus drei verschiedenen Werkstoffen (Dyneema, Technora und Vectran), zwei unterschiedlichen Seildurchmessern (2 mm und 6 mm) sowie zwei unterschiedlichen Macharten in die Versuchsmatrix aufgenommen. Abbildung 2 zeigt die ausgewählten Versuchsseile, deren Versuchsbezeichnungen sowie die wichtigsten Eigenschaften [6].






Seilbezeichnung	D2	T2	V2	V6	M6
Herstellerbezeichnung	D-pro	TechnaOne	VectraOne	VectraOne	MegaTwin Vectran
Abbildung					
Seilkonstruktion	geflochten, 12-fach	geflochten, 12-fach	geflochten, 12-fach	geflochten, 12-fach	Kernmantel; Kern gedreht, 4 Litzeln 8 Game Mantel geflochten
Faserwerkstoff	UHMWPE; Dyneema SK78	Aramid; Technora T221	aromatisches Polyester; Vectran HT	aromatisches Polyester; Vectran HT	aromatisches Polyester; Vectran HT
d_s [mm]	2	2	2	6	6
F_m [daN] (laut Hersteller)	410	390	420	3444	1667

Abbildung 2. Matrix der ausgewählten Versuchsseile [6]

Die drei genannten Werkstoffe bezeichnen allesamt keinen Werkstoff, sondern sind eingetragene Handelsnamen von am Markt konkurrierenden Unternehmen. So handelt es sich bei Dyneema um ein Polyethylen der niederländischen Firma DSM Dyneema mit sehr langkettigen Molekülen und somit mit ultrahoher molarer Masse. (Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene = UHMWPE). Technora bezeichnet ein aromatisches Polyamid (ARAMID) des japanischen Chemieunternehmens Teijin, während es sich bei Vectran um ein aromatisches Polyester von Kuraray handelt.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

In realen Hubtrieben überlagern sich verschiedene Beanspruchungen permanent. So unterliegt ein Seil beim Lauf über Scheiben und Rollen einer Biegebeanspruchung B . Wird Hubarbeit an einer Masse m verrichtet, so entstehen durch die Beschleunigung und Verzögerung der trägen Masse schwellende Zugbeanspruchungen F in den Seilsträngen (s. Abbildung 3).

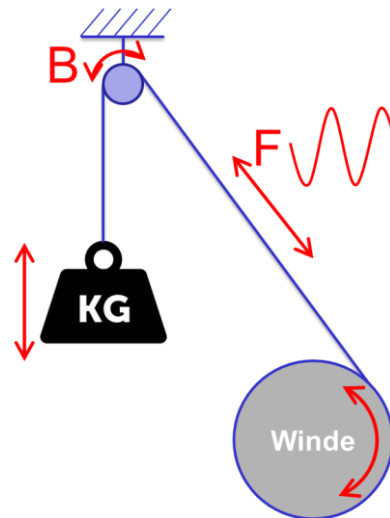


Abbildung 3. Trennung der überlagerten Beanspruchungen

Diese sich überlagernden Beanspruchungen lassen sich durch systematische Auswahl geeigneter Versuchsmethoden experimentell separat erfassen. Hierzu werden Zug-Schwell-Versuche (ohne Biegebeanspruchung) auf einem Pulsator sowie Dauer-Biegeversuche (mit konstanter Last) auf einer Standard-Dauerbiegemaschine durchgeführt.

3.1 ZUG-SCHWELL-VERSUCHE

Die erforderlichen Zug-Schwell-Versuche wurden auf einer institutseigenen Zug-Schwell-Prüfmaschinen mit einer statischen Höchstzuglast von $F = 75 \text{ kN}$ durchgeführt. Um der Zielsetzung einer hochdynamischen Untersuchung Rechnung zu tragen, wurden zwei verschiedene, relativ hohe Prüffrequenzen von $f = 2 \text{ Hz}$ und $f = 4 \text{ Hz}$ ausgewählt. Die aufgebrachte Last wurde ebenfalls in zwei Bereichen variiert, nämlich zwischen 15% und 30% und 30% und 50% der Bruchlast laut Herstellerangabe. Der Dauerfestigkeitsbereich

wurde auf $N \geq 0,5 \times 10^6$ Schwingenspiele festgelegt. Nach Durchführung aller notwendigen Zug-Schwell-Versuche konnte festgestellt werden, dass alle Probanden den selbstgewählten Dauerfestigkeitsbereich ohne Bruch überlebten. Auch bei einzelnen, weiterführenden Zug-Schwell-Versuchen konnte bei einer Überschreitung von 3.000.000 Schwingenspielen kein Seilbruch registriert werden.

3.2 ZERREISSVERSUCHE

Im weiteren Verlauf wurden die Prüflinge aus den vorausgegangenen Zug-Schwell-Versuchen einer Prüfung auf Restbruchkraft unterzogen. Auf diese Weise kann eine eventuell durch Zug-Schwell-Bbeanspruchung eingetretene Schädigung der Versuchsseile quantitativ erfasst werden. Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Versuchsergebnisse für das Versuchsseil D2 aus Dyneema. Der oberste Balken zeigt hierbei die wirklich Bruchkraft F_w laut Herstellerangabe, die als Referenz zu 100 % gesetzt ist. Die beiden folgenden Diagramm-Balken stellen die mit zwei verschiedenen Endverbindungen ermittelte statische Restbruchkraft eines Prüflings ohne Zug-Schwell-Bbeanspruchung dar. Die letzten vier Balken stellen die Ergebnisse der Zerreißversuche der Prüflinge mit Zug-Schwell-Vorbeanspruchung dar.

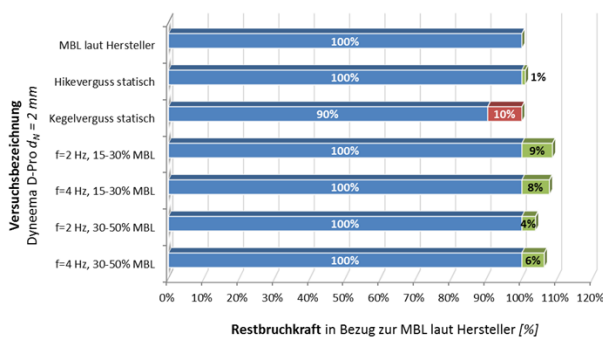


Abbildung 4. Ermittlung der Restbruchkraft Versuchsseil D2

Hieraus wird deutlich ersichtlich, dass die Versuche mit Zug-Schwell-Vorbeanspruchung durchweg eine höhere Bruchkraft erzielen als die Versuche ohne Zug-Schwell-Vorbeanspruchung. Durch die Aufbringung von 500.000 Schwingenspielen wurde somit keinerlei messbare Schädigung der Prüflinge hervorgerufen. Im Gegenteil hierzu führte die Zug-Schwell-Vorbeanspruchung sogar zu einer Verfestigung der Versuchsseile und somit zu einer Zunahme an Restbruchkraft.

3.3 STANDARD DAUERBIEGEVERSUCHE

Bei einem Dauerbiegeversuch handelt es sich um einen standardisierten Versuch, in dem laufende Seile unter niedriger Dynamik auf Ihre Lebensdauer beim Lauf über Scheiben geprüft werden. Abbildung 5 zeigt eine klassische Dauerbiegemaschine sowie deren zugehöriges Bewegungsprofil. Man sieht, wie sich sowohl die Geschwindigkeit wie auch die Beschleunigung sinusförmig über der Zeit t ändern und somit nie einen konstanten Wert annehmen.

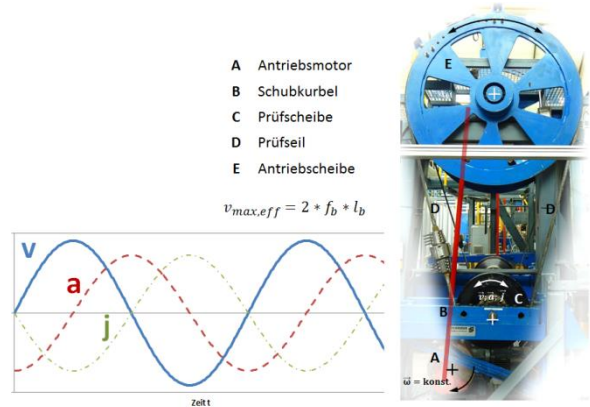


Abbildung 5. Bewegungsprofil eines Standard-Dauerbiegeversuchs

Zur Ermittlung von Referenzwerten wurden alle fünf Versuchsseile unter verschiedenen Belastungen in Standard-Dauerbiegeversuchen untersucht. Die Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Standard-Dauerbiegeversuche. Hierbei sind im doppel-logarithmischen Schaubild auf der Abszisse die durchmesserbezogene Seilzugkraft S/d^2 und auf der Ordinate die Lebensdauer N in Anzahl Zyklen abgetragen.

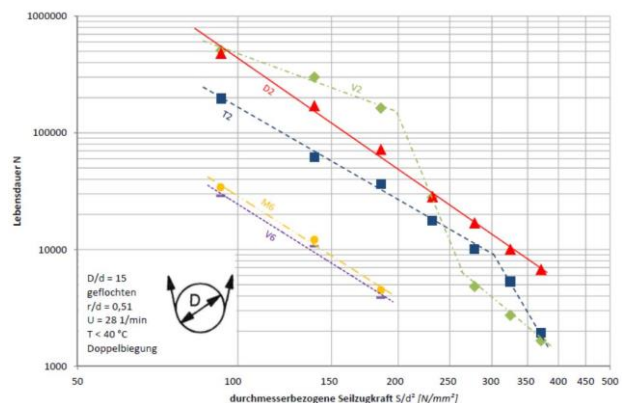


Abbildung 6. Ergebnisse Standard-Dauerbiegeversuche

Es zeigt sich, dass dünnere Seile wesentlich höhere Lebensdauern erreichen als dickere, wobei vor allem im unteren Lastbereich die beiden Seile D2 (Dyneema, 2 mm) und V2 (Vectran, 2 mm) die mit Abstand höchsten Werte erzielen. Die beiden dickeren Seile M6 und V6 zeigen vergleichbar hohe Lebensdauern an, wobei zu berücksichtigen ist, dass das Versuchsseil M6 auf Grund seiner Konstruktion (ummanteltes, gelegtes Seil) nur über ca. halb so viele tragende Fasern verfügt wie das offene Geflecht V6 und somit höher beansprucht wird. Vor diesem Hintergrund ist das Ergebnis des Versuchsseils M6 als verhältnismäßig besser zu betrachten.

3.4 HOCHDYNAMISCHE DAUERBIEGEVERSUCHE

Wie in Abschnitt 3.3 bereits erwähnt und in Abbildung 5 grafisch dargestellt, lassen sich mit klassischen Dauerbiegemaschinen keine konstanten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Versuchsseils erzeugen. Zudem sind

die erreichbaren Maximalwerte mit Geschwindigkeiten von $v_{\max} \approx 0,2 \text{ m/s}$ sehr gering und liegen weit von den tatsächlichen Werten im realen Einsatzfall entfernt. Aus diesen Gründen war es für das vorliegende Forschungsprojekt zwingend notwendig einen neuartigen, hinsichtlich des Bewegungsprofils vollkommen frei programmierbaren Groß-Prüfstand zu konzipieren, zu konstruieren, zu erstellen und in Betrieb zu nehmen, mit dem Geschwindigkeiten von bis zu $v = 10 \text{ m/s}$ und Beschleunigungen bis $a = 100 \text{ m/s}^2$ realisiert werden können. Abbildung 7 zeigt ein Modell des neuen Hochdynamik-Prüfstands, wie er nun am IFT zur Verfügung steht. Der Prüfstand verfügt über vier unabhängige Prüfstellen, die über Original Seilroboter-Winden angetrieben werden.

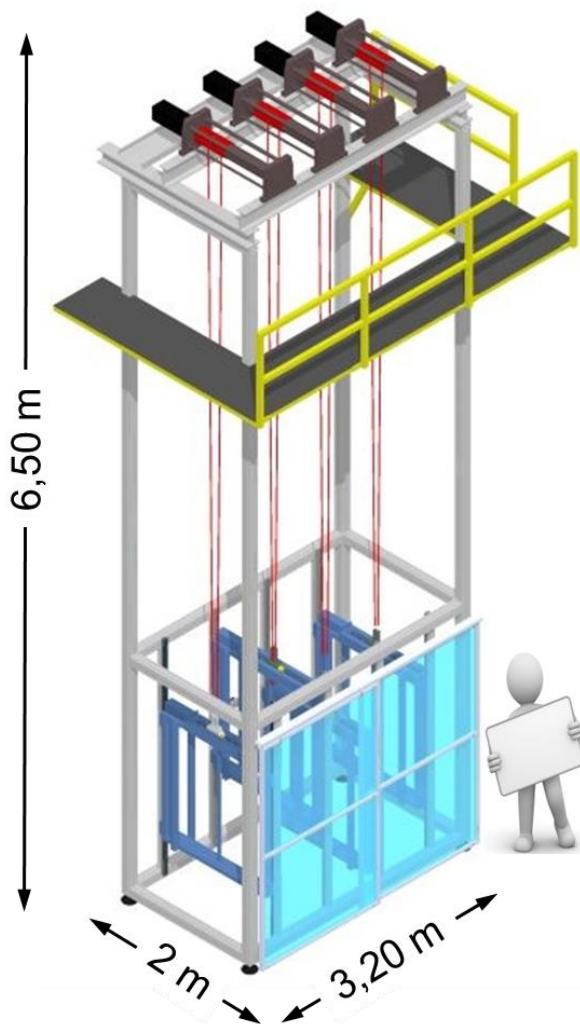


Abbildung 7. Modell des Hochdynamik-Prüfstands

Aufbauend auf den Ergebnissen aus klassischen Dauerbiegeversuchen wurden auf dem eigens erstellten Hochdynamik-Prüfstand über 100 hochdynamische Biegeversuche unter Variation der Parameter Geschwindigkeit und Beschleunigung durchgeführt. Dabei wurden Geschwindigkeiten von bis zu $v = 10 \text{ m/s}$ und Beschleunigungen von bis zu $a = 100 \text{ m/s}^2$ realisiert. Abbildung 8 zeigt exemplarisch

das Ergebnis aus hochdynamischen Biegeversuchen für das Versuchsseil D2 aus Dyneema. Auf der Abszisse sind dabei die verschiedenen Seilgeschwindigkeiten abgetragen, während Versuche mit gleicher Beschleunigung farblich zusammengefasst sind. Auf der Ordinate wird eine relative Lebensdauer angegeben, die sich aus der in hochdynamischen Biegeversuchen erzielten Lebensdauer in Bezug zu der in Standard-Dauerbiegeversuchen erreichten Lebensdauer ergibt.

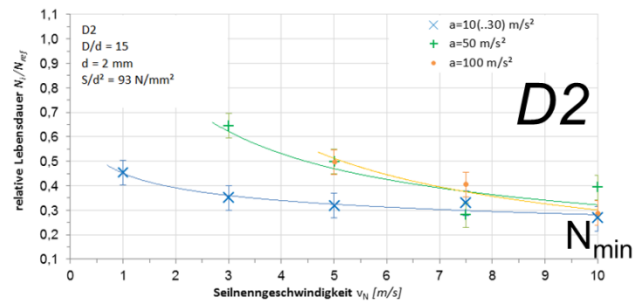


Abbildung 8. Ergebnisse der hochdynamischen Biegeversuche, Versuchsseil D2

Hierbei zeigt sich deutlich, dass die Lebensdauer des Versuchsseils unter hochdynamischer Beanspruchung stetig abnimmt. Bei maximaler Geschwindigkeit und Beschleunigung wird ein Grenzwert erreicht, der nur noch ca. 29% der aus Standard-Dauerbiegeversuchen erzielten Lebensdauer entspricht.

Die Abnahme der Lebensdauer durch hochdynamische Beanspruchung ist dabei für jedes Versuchsseil spezifisch und unterscheidet sich von Versuchsseil zu Versuchsseil teils sehr stark. Die Abbildung 9 zeigt die maximale Einbuße an Lebensdauer für die fünf unterschiedlichen Versuchsseile.

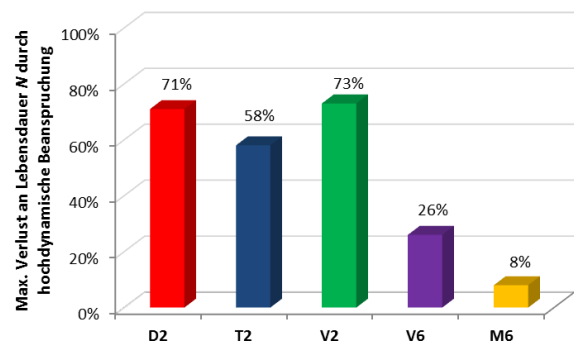


Abbildung 9. Verlust an Lebensdauer durch hochdynamische Beanspruchung

Bereits auf den ersten Blick wird deutlich, dass die Lebensdauer-Einbußen für die dünnen Seile wesentlich stärker ausfallen wie für die dickeren Seile. Dies lässt sich mit dem Verschleiß- und Versagensverhalten der Seile erklären. So liegt der Haupt-Schädigungsmechanismus der hochdynamisch beanspruchten Seile in einem abrasiven Außenverschleiß begründet, der durch Relativbewegung zwischen Seil

und Scheibe hervorgerufen wird. Aufgrund des prozentual höheren Anteils an außenliegenden Fasern bei dünneren Seilen wirkt sich dieser Verschleißprozess auf dünne Seile wesentlich stärker aus. Das Versuchsseil M6 verfügt über einen schützenden Mantel, der den starken Außenverschleiß der tragenden Fasern weitestgehend unterbindet, weshalb die Einbuße an Lebensdauer für das Versuchsseil M6 lediglich maximal 8 % beträgt.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojekts wurde erstmalig der Einfluss der hochdynamischen Beanspruchung auf die Lebensdauer hochmodularer Faserseile untersucht. Hierzu wurde eigens ein neuartiger Groß-Prüfstand konstruiert und erstellt. Durch geschickte Wahl der Versuchsseile liegen nun erste Erkenntnisse zu den wichtigen Parametern

- Material,
- Durchmesser und
- Machart

unter verschiedenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen vor. Der Einfluss der Dynamik auf die Seillebensdauer konnte in einem weiten Bereich bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen untersucht werden. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen ist, dass die Zug-Schwell-Beanspruchung hinsichtlich der Lebensdauerminde- rung laufender Faserseile vernachlässigbar ist.

Die Lebensdauerminde- rung hochdynamisch bean- spruchter Faserseile basiert auf Verschleiß, hauptsächlich Außenverschleiß, der Seil beim Lauf über Scheiben. Hierbei sind die Kontaktbedingungen zwischen Seil und Scheibe ausschlaggebend. Dies sollte bei der Konstruktion neuer Seil- triebe berücksichtigt werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich hochmodu- lare Faserseile prinzipiell sehr gut für hochdynamische Bean- spruchungen eignen, jedoch noch enormer Forschungsbedarf auf dem Gebiet der hochmodularen Faserseile besteht.

LITERATUR

- [1] Pott, A. IPAnema: Parallele Seilroboter für die Intra- logistik. In *Hebezeuge Fördermittel*, 256–258.
- [2] Pott, A. *Paralleler Seilroboter zur Handhabung in allen Größen*. Fraunhofer Institut für Produktions- technik und Automatisierung IPA, Stuttgart.
- [3] Heinze, T. 2013. *Zug- und biegewechselbean- spruchte Seilgeflechte aus hochfesten Polymerfa- sern*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.

- [4] Wehking, K.-H. 2014. *Hochdynamische Beanspru- chung von hochfesten Faserseilen in parallelen Seil- kinematiken*. DFG-Forschungsantrag, WE 2187/29- 1.
- [5] Kühner, K. 2008. Experimentelle Erprobung und In- betriebnahme eines Seilroboters. Studienarbeit, Uni- versität Stuttgart.
- [6] Wehr, M. 2017. Beitrag zur Untersuchung von hoch- festen, synthetischen Faserseilen unter hochdynami- scher Beanspruchung. Dissertation, Universität Stuttgart.

Dipl.-Ing. Martin Wehr, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart.

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Holzgar- tenstraße 15B, 70174 Stuttgart

E-Mail: martin.wehr@ift.uni-stuttgart.de

