

Vorstudie zum Einsatz hochfester Faserseile in schnell- laufenden Treibscheibenanwendungen

Initial research study on implementation of high tensile fibre
ropes in high speed traction sheave applications

Marco Testa

Abteilung Seiltechnologie
Institut für Fördertechnik und Logistik
Universität Stuttgart

Der Einsatz von Stahldrahtseilen in traktionsbehafteten Seiltrieben bietet durch den hohen Wissensstand über die Lebensdauer laufender Seile eine sehr hohe Betriebssicherheit. Bei Förderhöhen über 500 Metern sind Stahldrahtseile jedoch nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar. Daher werden alternative Materialien für den Einsatz in Treibscheibenanwendungen erprobt.

[Schlüsselwörter: hochfeste Faserseile, Treibscheibenantrieb, Lebensdauer, Schädigungsverhalten]

The use of steel wire ropes in traction rope drives offers a very high level of operating safety due to the high level of knowledge about the lifetime of running ropes. However, steel wire ropes can no longer be used economically at heights of more than 500 meters. Alternative materials are therefore being tested for use in traction sheave applications.

[Keywords: high tensile fibre ropes, traction sheave drive, lifetime, damage behavior]

1 PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION

In der Fördertechnik sind Seile, Riemen und Ketten die zentralen Maschinenelemente zur Übertragung von Zugkräften sowie Tragmittel zur Beförderung von Gütern und Personen. Vor allem in Aufzügen, Kränen, Schachtförderanlagen und in Regalbediengeräte kommen Stahldrahtseile als Tragmittel zum Einsatz. Durch den hohen Wissensstand über die Lebensdauer laufender Seile, regelmäßige Inspektionen und ausgereifte Prüfverfahren bietet der Einsatz von Stahldrahtseilen eine sehr hohe Betriebssicherheit in Förderanlagen.

Mit immer weiter fortschreitender Entwicklung in der Architektur werden neue Zielgrößen hinsichtlich der Gebäudehöhe definiert. Personenaufzüge sind derzeit durch das hohe Eigengewicht ihrer Tragmittel (Stahldrahtseile)

bei einer Förderhöhe von etwa 500 Meter limitiert. Bei Gebäuden über 500 Meter Förderhöhe sind daher übereinander angeordnete Aufzugsgruppen erforderlich. Neben den Komfort- und Zeiteinbußen durch den Zwang des Umsteigens kommen deutlich höhere Anlagekosten hinzu. [HEI-10; MAM-15]

Neben den Bestrebungen in der Personenbeförderung steht die Gewinnung von Bodenschätzen in Tiefen von mehr als 3000 Meter als weitere Zielgröße in der Entwicklung von Tragmitteln. In Schachtförderanlagen und Minen ist die angestrebte Fördertiefe bisher nur über mehrere Förderstufen und eine erhebliche Absenkung der Seilsicherheit realisierbar. [MAM-15]

Um größere Förderhöhen zu realisieren, müssten die Zugfestigkeit der Stahldrahtseile gesteigert und das Seileigengewicht reduziert werden. Die Optimierungsmöglichkeiten von Stahlseilen sind jedoch ausgeschöpft. Um den Zielgrößen dennoch gerecht zu werden, muss die Fördergutmasse und zugleich der Seilsicherheitsfaktor reduziert werden. Dies führt jedoch zu erheblichen Nachteilen:

- Eine Reduktion des Fördergutstroms reduziert die Wirtschaftlichkeit der Anlage.
- Eine Absenkung des Sicherheitsfaktors wirkt sich negativ auf die Seillebensdauer und damit auf die Betriebssicherheit sowie die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Anlage aus.

Die wirtschaftlichen und technologischen Zielgrößen nach immer größeren Förderströmen und -höhen bringen den Einsatz von Stahldrahtseilen an die Grenzen. Darüber hinaus sind diese korrosionsanfällig und erfordern den Einsatz von Schmierstoffen. Aus diesen Nachteilen folgt das Bestreben nach einem anderen Seilwerkstoff, der die bereits formulierten und zukünftigen Zielgrößen bedient.

Der Einsatz von synthetischen Faserseilen hat sich bereits im Sport, in maritimen Bereichen, in der Forstindustrie und als Anschlagmittel bewährt. Faserseile aus Polyamid (PA), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) sind bereits seit Jahrzehnten im Einsatz und bilden eine erste Alternative zu Stahldrahtseilen. Hochfeste Fasern aus Aramid, Flüssigkristallpolymer (TLCP) und hochmolekularem Polyethylen (HMPE) stellen den momentanen Stand der Technik dar. Besonders Seile aus hochfesten Fasern sind mit Stahldrahtseilen konkurrenzfähig und übertreffen die Eigenschaften in einigen Punkten erheblich, was neue Möglichkeiten in der industriellen Anwendung eröffnet. [ROS-13]

Der Einsatz von hochfesten Faserseilen als laufende Seile in Förderanlagen übertrifft beide Kernanforderungen. Faserseile besitzen gegenüber Drahtseilen eine 1,5- bis 3-fach höhere Zugfestigkeit und zugleich ein 7- bis 8-fach geringes längenbezogenes Seilgewicht. Dadurch ist die Reißlänge eines hochfesten Faserseils 8- bis 14-mal höher als bei Drahtseilen wodurch größere Förderhöhen realisierbar sind und die Reihenschaltung von Schachtförderanlagen hinfällig wird.

Durch die höhere Zugfestigkeit bei gleichbleibender Fördergutmasse vergrößert sich der Sicherheitsfaktor, wodurch längere Wartungsintervalle möglich sind. Wird der Sicherheitsfaktor beibehalten, sind größere Förderkapazitäten möglich, die die Wirtschaftlichkeit der Anlage steigern. Das geringe längenbezogene Gewicht der Tragmittel führt zu einer Verbesserung der Energiebilanz, da geringere Massen beschleunigt und verzögert werden müssen. Das geringe Gewicht der Tragmittel führt ebenso zu geringeren Instandhaltungskosten, da der Zeitbedarf für das Auflegen und Positionieren der Tragmittel geringer ist. [HEI-14; HEI-10]

Weshalb trotz der Vorteile von Faserseilen überwiegend Stahldrahtseile in der Fördertechnik zum Einsatz kommen, liegt an dem geringen Untersuchungs- und Erkenntnisstand von hochfesten Fasern. Dadurch wird der Einsatz von Faserseilen in fördertechnischen Anlagen mangels der geringen Anzahl an Normen, Richtlinien und wissenschaftlichen Publikationen oftmals nicht realisiert. [MAM-15; MIC-11]

Dieses Forschungsdefizit wird in Abbildung 1 verdeutlicht. Jedoch wird seit einigen Jahren die Forschung an hochfesten Polymerfasern verstärkt von Herstellern, Anwendern, Betreibern und wissenschaftlichen Einrichtungen vorangetrieben. Für einen flächendeckenden Einsatz von hochfesten Faserseilen in fördertechnischen Anlagen müssen jedoch weitere grundlegende Erkenntnisse zur Dimensionierung, Biegewechselfestigkeit, Verschleißverhalten, Reibwerten, Lebensdauer und Ablegereife, in Form von experimentellen Untersuchungen, die sich an realen Anforderungen ausrichten, erarbeitet werden. [MIC-11; HEI-14]

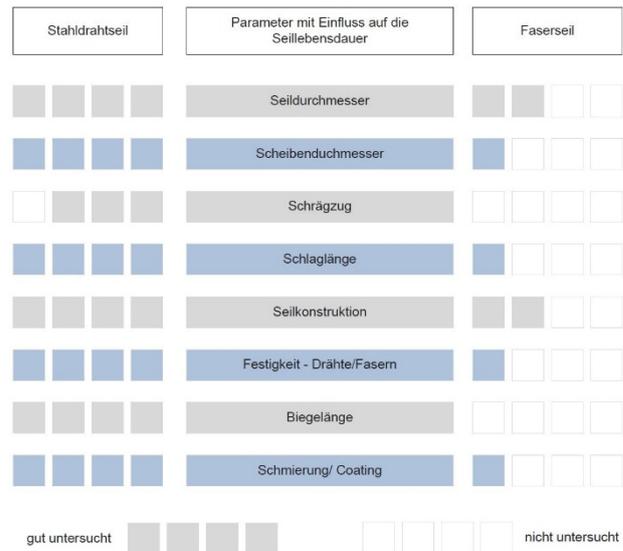


Abbildung 1. Forschungsdefizit von Faserseilen gegenüber Stahldrahtseilen [KÜH-16]

1.1 ZIELSETZUNG DER ARBEIT

In der Fördertechnik sind vor allem laufende Seile von großem Interesse. Die bisherigen Untersuchungen und Forschungen haben bereits gesicherte Ergebnisse über das Biegeverhalten einzelner Faserwerkstoffe und Seilkonstruktionen durch Dauerbiegeversuche hervorgebracht. Dabei wird das Seil ohne Tangentialschlupf über eine Prüfscheibe hin- und herbewegt. In Treibscheibenanwendungen ist neben der Seilbiegung der Schlupf zwischen Seil und Treibscheibe ein entscheidender Schädigungsfaktor, der die Seillebensdauer herabsetzt.

Das Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einsatz von hochfesten Faserseilen als Tragmittel für schnelllaufende Treibscheibenanwendungen zu bewerten. Hierfür wurden traktionsbehaftete Dauerbiegeversuche mit hochfesten Faserseilen durchgeführt. Dafür steht am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart ein Großversuchsstand mit Treibscheibenantrieb und einem Hub (Biegelänge) von 8 Metern zur Verfügung (Abbildung 2).

Mit diesen ersten aus Laborversuchen gesicherten Ergebnissen kann ein Grundverständnis für den Einsatz von hochfesten Faserseilen in Treibscheibenantrieben gewonnen werden, die vor allem für ausgedehnte Tests, Versuche und Forschungsvorhaben für die Industrie neue Möglichkeiten hinsichtlich Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit, Komfort und Wirtschaftlichkeit aufzeigen werden.

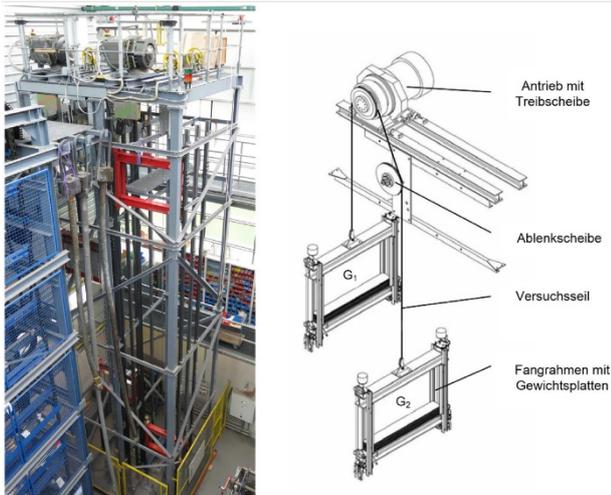


Abbildung 2. Großversuchsstand am IFT [Ber-11]

2 BELASTUNGSKOLLEKTIV LAUFENDER SEILE

Über Scheiben laufende Seile werden durch ein Belastungskollektiv aus schwellender Biege- und Zugspannung, Pressung, Ovalisierungsspannung und Relativbewegungen der einzelnen Seilbestandteile zueinander belastet. Tragseile eines Treibscheibenantriebs erfahren zudem noch Reibverschleiß, der sich auf Grund des Schlupfs zwischen Seil und Rille ergibt. Da Seile keine dauerfesten Maschinenelemente sind, führen diese Belastungen zu Materialermüdung und mit fortschreitendem Verschleiß zum Lebensende des Seils. Der Betrieb bis zum vollständigen Versagen des Seils ist im Regelfall zu vermeiden. In technischen Systemen ist es daher umso wichtiger, die Ablegereife bzw. die Ablegekriterien des Seils rechtzeitig und zuverlässig zu erkennen und gegebenenfalls das Seil zu ersetzen. [WEH-05; MIC-11; BER-11]

Die Seillebensdauer und Ablegereife hängt neben dem bereits genannten Belastungskollektiv von vielen weiteren anlagenspezifischen und seilspezifischen Parametern ab. Die nachfolgende Tabelle 1 fasst diese zusammen:

Tabelle 1. Einflussfaktoren der Seillebensdauer [WEH-05]

Anlagenspezifische Parameter	Seilspezifische Parameter
• Seilzugkraft	• Seilkonstruktion
• D/d-Verhältnis	• Faserwerkstoff
• Biegelänge	• Fasernennfestigkeit
• Schrägzug	• Beschichtung / Coating
• Rillenform	• Seilnennendurchmesser
• Scheibenwerkstoff	
• Art der Biegung	

Eine Herangehensweise zur Erkennung der Ablegereife ist die Durchmesserreduktion. Hierbei ist ein starres Inspektionsintervall vonnöten, da die Durchmesserabnahme mit zunehmenden Biegewechselzahlen nur mäßig voranschreitet, kurz vor Seilbruch hingegen sehr stark. Eine weitere Maßnahme zur Erkennung der Ablegereife ist das Einbringen einer elektrisch leitenden Faser. Diese ist mit im Seilverband eingeflochten oder eingeschlagen und weist eine Biegeeweiseleigenschaft auf, die unterhalb der Seilfasern liegt. Damit bricht die elektrisch leitende Faser früher, wodurch die Ablegereife angezeigt wird. Ein Vorteil dieser Herangehensweise ist die Möglichkeit einer kontinuierlichen und automatischen Überwachung, ohne dass starre Prüfintervalle eingehalten werden müssen. [WEH-05]

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Gegenstand der Untersuchungen waren Kern-Mantelseile, die einen geschlagenen Kern aus Aramidfasern und einen geflochtenen Polyester- beziehungsweise Vectramantel besitzen. Die Versuche wurden mit einem D/d-Verhältnisse von 25 bei einem Seilnennendurchmesser von $d=12$ mm und einer Seilsicherheit von $S_f=12$ durchgeführt. Die verwendete Treibscheibe mit Rundrille ist aus Polyamid gefertigt.

Während der Laufzeit der Versuche wurden an 5 Prüfzonen entsprechend Abbildung 3 die Seildehnung, Seildurchmesser und Seilovalisierung kontinuierlich dokumentiert sowie eine visuelle Kontrolle des Seils durchgeführt.

In Position I befindet sich der Fahrkorb (FK) in seiner untersten Position und die Wegmarke $x=0$ mm liegt direkt auf der Treibscheibe auf. Durch die Hubbewegung wirken maximale Beschleunigungskräfte auf das Seilstück.

Position II stellt hinsichtlich der Fahrdynamik das Pendant zu Position I dar. In der Senkbewegung des Fahrkorbs wirken die geringsten Treibkräfte, da lediglich der Fahrkorb entsprechend der programmierten Fahrkurve verzögert wird. Hierbei ist es interessant, das Verschleißausmaß von Mantel und Kern gegenüber Position I zu vergleichen.

Position III ist die Zone der konstanten Fahrgeschwindigkeit. In diesem Bereich erfährt das Seilstück keine dynamischen Kräfte die sich aus der Beschleunigung des Massensystems ergeben.

Position IV¹ und IV² sind jeweils Bereiche des Versuchsseils, die keinen Kontakt zur Treibscheibe und Ablenkscheibe aufweisen und damit auch keiner Biegebeanspruchung ausgesetzt werden. Hierbei ist interessant zu untersuchen, ob vor allem der Seilkern trotzdem Schädigungen erfährt. Verdrehungen, Seilschwingungen, Verschiebungen von Kern zu Mantel oder Wankbewegungen

des Seils können in diesen Bereichen Litzen-zu-Litzen-Bewegungen hervorrufen und so innerlichen Verschleiß hervorrufen.

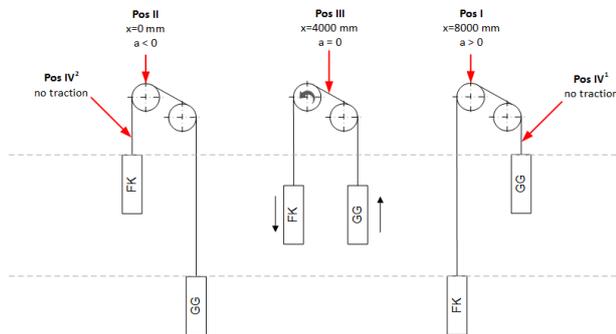


Abbildung 3. Positionen der Prüfzonen (FK: = Fahrkorb; GG: =Gegengewicht)

4 AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen die Ergebnisse von vier Versuchen gegenübergestellt werden. Die nachfolgende Tabelle 2 fasst die erreichte Lebensdauer sowie die Position der Schädigung zusammen.

Das Versuchsseil 420V ist bei der Zyklenzahl von 19.266 Zyklen vorzeitig abgelegt worden, da starke Vibrationen im Seil auftraten. Die restlichen drei Versuche sind bis zu den definierten Ablegekr iterien entsprechend der Richtlinie DIN EN ISO 9554 [DIN-11b] durchgeführt worden. Bei den Versuchsseilen 419P und 419V sind Litzenbrüche und partielle Mantelrisse aufgetreten, das Versuchsseil 420P ist nach 158.354 Fahrten vollständig gerissen. Die Position der Litzenbrüche bzw. des Seilrisses liegen alle in unmittelbarer Nähe der Seilmitte (Pos III nach Abbildung 3).

Tabelle 2. Ergebnisse der Versuchsreihe $D/d=25$

Versuch Nr. Seilbezeichnung	1 VEIS 419P	2 VEIS 420V	3 VEIS 419V	4 VEIS 420P
erreichte Lebensdauer	26.738	19.266	50.580	158.354
Grund des Versagens/ Ablegekr iterium	Riss v. Litze u. Mantel	Unruhiger Lauf u. Vibrationen	Riss v. Litze	Seilriss
Position der Schädigung	Pos III	-	Pos III	Pos III

4.1 SEILDURCHMESSER

Das nachfolgende Schaubild (Abbildung 4) zeigt den gemittelten Seildurchmesser aller Versuchsseile zum Zeitpunkt des Seilrisses des Versuchsseils 419P (420V wird aufgrund des abgebrochenen Versuchs nicht als Referenz gewertet). Dadurch ist sichergestellt, dass die Versuchsseile direkt miteinander vergleichbar sind.

Alle vier Versuche weisen in der Seilmitte den geringsten Durchmesserwert auf. Die bereits in Tabelle 2 aufgezeigten Positionen der Schädigung sind damit auf den reduzierten Seilquerschnitt an Pos III zurückzuführen. Zu den beiden Seilendpositionen nimmt der Seildurchmesser wieder zu. An den Seilpositionen Pos I und Pos II ist der übertragene Treibkraftbetrag maximal bzw. minimal. Hierbei erfährt die Pos I eine zahlenmäßig geringe, jedoch erkennbare größere Durchmesserreduktion als die Seilposition Pos II.

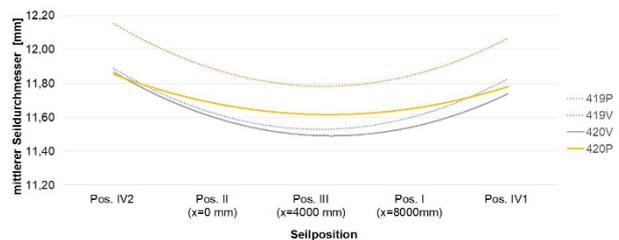


Abbildung 4. Mittlerer Seildurchmesser je Seilposition

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des Seildurchmessers von Versuch Nr. 3 (419V) mit ansteigender Fahrtenzahl. Jede Linie der Kurvenschaar repräsentiert eine Durchmessererfassung bei einer definierten Anzahl an Fahrten. Mit steigender Fahrtenzahl (in Pfeilrichtung) ist die Tendenz, wie sich die Durchmesserwerte vor allem in der Seilmitte verringern, deutlich zu erkennen.

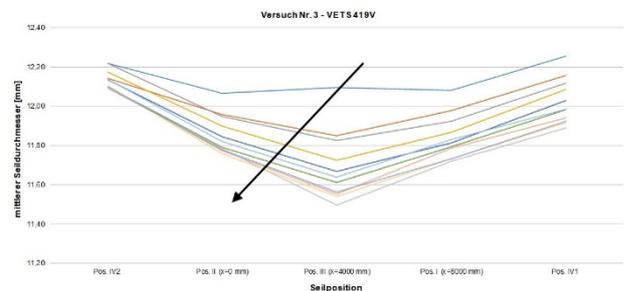


Abbildung 5. Entwicklung des Seildurchmessers mit ansteigender Zyklenzahl

Der Grund für eine fortschreitende Durchmesserreduktion und zugleich Ovalisierung des Seilquerschnitts liegt dem mechanischen Verschleiß der Fasern zugrunde. An den Kreuzungspunkten der Fasern bilden sich punktuelle Spannungsmaxima aus, die die Fasern zunehmend schädigen. Abbildung 6 zeigt einen fortgeschrittenen Schädigungszustand des Seilkerns. An den Kreuzungspunkten brechen einzelne Fasern und bilden so Freiräume in die wiederum intakte Fasern hineingedrückt werden und so neue Kreuzungspunkte bilden. Dieser fortschreitende Mechanismus führt im Zusammenspiel mit der Seilzugkraft und der Rillengeometrie zu einer Reduzierung des Seilquerschnitts.

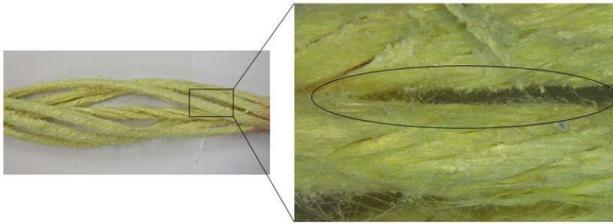


Abbildung 6. Verschleiß und Schädigung der Fasern im Litzenverband

4.2 SEILDEHNUNG

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der prozentualen Seildehnung der vier Versuchsseile bis zu ihrer Ablegereife.

Faserseile durchlaufen üblicherweise drei Phasen der Dehnung bis zur Ablegereife oder Bruch. In der ersten Phase erfährt das Faserseil eine starke und schnell zunehmende Dehnung. In der sich anschließenden zweiten Phase wird das Seil kaum gedehnt. Zum Ende der Lebensdauer und bei fortschreitendem inneren Verschleiß dehnt sich das Seil wiederum stark. [NOV-16]

Die ersten zwei Phasen der Seildehnung sind bei allen vier Versuchen (Bild 4.7) zu erkennen. Nach einer anfangs schnell zunehmenden Seildehnung stellt sich eine Phase mit mäßiger Dehnung ein. Der sich daran anschließende Wiederanstieg der Dehnungswerte (dritte Phase) ist vor allem bei den Versuchsseilen 419V und 420P zu erkennen. Das Versuchsseil 419P verharrt hingegen bis zur Ablegereife in einer Phase mit mäßiger Dehnung, ein Wiederanstieg der Seildehnung ist nicht zu erkennen. Beim vorzeitig abgebrochenen Versuch Nr. 2 (Versuchsseil 420V) sind trotz der kurzen Versuchsdauer von nur 19.266 Fahrten alle drei Phasen der Dehnung zu erkennen.

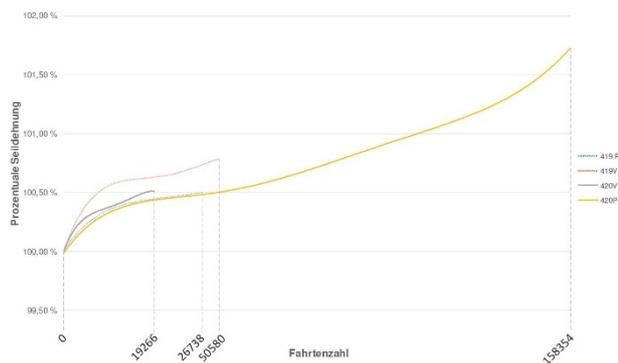


Abbildung 7. Verlauf der Seildehnung bis zur Ablegereife

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Versuchsseile des Typs 419 und 420 unterscheiden sich bezogen auf den lasttragenden Kern ausschließlich in ihrer Schlaglänge. Daher kann angenommen werden, dass die Schlaglänge einen wesentlichen Einfluss auf die

Verhaltensweisen der Versuchsseile gegenüber Seildehnung, Durchmesserreduktion und Seilovalisierung ausübt.

Eine kurze Schlaglänge erzeugt eine große Konstruktionsdehnung, die Seilfestigkeit sinkt jedoch [MCK-04]. Die Schlaglänge des Seilkerns des Typs 420 ist 8 mm kürzer als die des Typs 419. Das Versuchsseil 420P erreicht bis zum Seilriss eine Seildehnung von 1,78% (Bild 4.8). Das Versuchsseil 420V wird aufgrund des vorzeitigen Versuchsabbruchs an dieser Stelle nicht weiter beachtet. Gegenüber dem Versuchsseil 420P weisen die beiden Versuchsseile des Typs 419 eine deutlich geringere Seildehnung bis zu ihrer Ablegereife auf. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass beide Versuchsseile des Typs 419 keinen kompletten Seilriss erfahren, sondern aufgrund eines Litzenbruchs abgelegt worden sind.

Hinsichtlich der Seildehnung und der Reduzierung des Seildurchmessers ist dem Mantelwerkstoff der Versuchsseile kein Einfluss zuzuschreiben. Dennoch ist der Seilmantel ein wichtiges Element des Versuchs, da dieser mit der Rillenoberfläche die Treibkraftübertragung sicherstellt. Eine quantitative Versuchsauswertung, wie diese bei der Seildehnung erfolgte kann für das Verhalten der Manteloberflächen nicht erfolgen.

6 AUSBLICK

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit liefern erste wichtige Erkenntnisse für den Einsatz von hochfesten Faserseilen in schnelllaufenden Aufzügen. Es wurde nachgewiesen, dass das Materialverhalten der Versuchsseile auf das Belastungskollektiv, der auftretende Schlupf und das tribologische Verhalten der Seil-Rille-Kombination beherrschbare Größen in der Versuchsdurchführung sind. Die Grundlage dafür bilden die durchgeführten schlupfbehaferten Dauerbiegeversuche am Großversuchsstand des IFT.

Im Fokus zukünftiger Untersuchungen sind vor allem die Seilwerkstoffe und Seilkonstruktionen sowie die eingesetzten Seilscheiben in Dimension, Rillenform und Werkstoff in großem Umfang zu untersuchen. Weitere praxisrelevante Forschungsthemen liegen in der Erhöhung der Nenngeschwindigkeit und Beschleunigungswerte sowie der Untersuchung der auftretenden Seilschwingungen und Vibrationen bei großen Förderhöhen.

LITERATUR

- [BER-11] Berner, Oliver; Lebensdauer von Stahlseilen beim kombinierten Lauf über Treib- und Ablenkscheiben unterschiedlicher Rillenform, Stuttgart, 2011, Stuttgart.
- [DIN-11b] DIN EN ISO 9554; Faserseile - Allgemeine Festlegungen, 2011.
- [FRE-16a] Freie Universität Berlin; Chemiefasern, 2016,
<http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/fasern.htm>.
- [HEI-10] Heinze, Thorsten; Speck, Markus; Textile Tragmittel in der Fördertechnik, in: Logistics Journal Proceedings, 2010.
- [HEI-14] Heinze; Dr. Thorsten; Kurtz, Peter; Engenhardt, Bernd; Treibscheibenaufzüge mit Faserseil,
in: Lift Report, 40, 2014, S. 10–16.
- [KÜH-16] Kühner, Konstantin; Faserseile als Tragmittel im Bühnenbetrieb, Baden-Baden, 19.03.2016. Euraka Fachtagung Baden-Baden - Faserseile als Tragmittel, 19. März 2016.
- [MAM-15] Mammitzsch, Jens; Untersuchung zum Einsatz von ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in Seilen für die Fördertechnik, Chemnitz, 2015 Dissertation, Chemnitz.
- [MCK-04] McKenna, H. A.; Hearle, J. W. S.; O'Hear, N.; Handbook of fiber rope technology, Boca Raton, Cambridge. CRC Press; Woodhead Pub, 2004.
- [MIC-11] Michael, Markus; Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten synthetischen Faserseilen, Chemnitz, 2011 Dissertation, Chemnitz.
- [NOV-16] Novak, Gregor; Einsatz hochmodularer Faserseile in fördertechnischen Anwendungen am Beispiel eines Regalbediengerätes, 2016.
- [ROS-13] Rost, Arne; Untersuchung von Antrieben mit Kunststoff-Faserseilen für den Einsatz in Leichtbau-Gelenkarmrobotern, Stuttgart. Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, 2013.
- [VDI-90] VDI 2500; Faserseile Beschreibungen - Auswahl - Bemessung, 1990.
- [WEH-05] Wehking, Karl-Heinz; Laufende Seile: Bemessung und Überwachung; mit 21 Tabellen, 3. Auflage, Renningen. Expert-Verl., 2005.

Marco Testa M.Sc., Research Assistant at the Institute of Mechanical Handling and Logistics, University of Stuttgart.

Marco Testa was born 1988 in Balingen, Germany. Between 2013 and 2016 he studied Mechanical Engineering at the University of Stuttgart.

Address: Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 15b , 70174 Stuttgart, Germany,

Phone: +49 711 685 83796, Fax: +49 711 685 83769,

E-Mail: marco.testa@ift.uni-stuttgart.de