

Einsatz hochmodularer Faserseile in fördertechnischen Anwendungen am Beispiel eines Regalbediengerätes

Use of high-modulus fibre ropes in rope drives using the example of S/R-machines

Gregor Novak

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

Hochmodulare Faserseile bieten dem Anwender gegenüber Drahtseilen eine Reihe von Vorteilen, die einen Einsatz in fördertechnischen Anwendungen sinnvoll erscheinen lassen. Um die Einsatzmöglichkeiten hochmodularer Faserseile zu erforschen hat das Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) mehrere Forschungsprojekte im Bereich der laufenden hochmodularen Faserseile und Endverbindung durchgeführt.

[Hochmodulare Faserseile, Seiltriebe, Ablegereifeerkennung, Regalbediengerät, Krane]

High-modulus fibre ropes offer a variety of advantages for the user. These advantages can be used in machines of the logistics sector such as storage and retrieval (S/R) machines. To determine possible applications the Institute for mechanical handling and logistics (IFT) performed several research projects in the field of running high-modulus fibre ropes and end connection.

[High-modulus fibre ropes, Rope drives, Discard criteria, S/R-machine, Crane]

1 EINFÜHRUNG

Die in den 1960ern eingeführten hochmodularen Faserseile wurden zuerst in der Offshore-Industrie als Mooring-Lines für Plattformen und Schiffe und für das Bergsteigen als Statikseile eingesetzt [McK04]. Im Laufe der 1990er wurde die Kran-Industrie, vor allem im Offshorebereich, auf hochmodulare Faserseile aufmerksam und prüfte deren Einsatzmöglichkeiten in sogenannten laufenden Anwendungen als Hubseile [Tor10], [Hop97], [Vog98]. Das Hauptziel war hierbei die Erreichung größerer Tiefen, um schwere Lasten auf den Meeresgrund in Tiefen von bis zu 3000 Metern abzusenken. Aufgrund des großen Eigengewichtes der Drahtseile können Tiefen von 3000 Metern nur mit einer Gewichtsreduzierung der

Last erreicht werden. Faserseile haben hier den Vorteil, dass Sie aufgrund einer geringeren Dichte ein kleineres Eigengewicht aufweisen und im Falle von HMPE sogar schwimmfähig sind.

Heutzutage möchten die Hersteller von Mobilkränen [Sam14] und anderen Hubeinrichtungen wie Regalbediengeräten ebenfalls hochmodulare Faserseile einsetzen. Hochmodulare Faserseile bieten für diese Art von Maschinen zwei Hauptvorteile. Als erstes muss das geringe Seileigengewicht (ca. 75 - 80% weniger im Vergleich zu einem Drahtseil) genannt werden, das bei Mobilkränen ein geringeres Transportgewicht bedeutet und ein geringerer Energiebedarf beim Beschleunigen und Abbremsen bei Regalbediengeräten. Zweitens erlauben hochmodulare Faserseile eine Reduzierung der Umlenkscheiben und der Seiltrommel. Dies führt zu einer kompakteren Bauweise und im Falle der Trommel zu einer Reduzierung der Getriebegröße. Im Falle der reduzierten Getriebegröße können Einsparungen pro RBG von ca. 1500 € erreicht werden.

Um hochmodulare Faserseile sicher und wirtschaftlich einsetzen zu können müssen folgende Punkte beachtet werden:

1. Entwicklung eines auf Biegebeanspruchung optimiertes Faserseil
2. Kenntnis der Lebensdauer der Faserseile und die Verfügbarkeit einer Berechnungsmethode
3. Entwicklung verifizierter Ablegereifekriterien
4. Kenntnis wie ein Seiltrieb für Faserseile aufgebaut sein muss

Die ersten drei Arbeitspunkte wurden innerhalb zweier am IFT durchgeführter Forschungsprojekte untersucht und werden im Folgenden vorgestellt.

2 AM IFT DURCHFÜHRTE FORSCHUNGSPROJEKTE IM BEREICH DER LAUFENDEN FASERSEILE

Am IFT wurden zwei Forschungsprojekte durchgeführt, um die Einsatzmöglichkeiten hochmodularer Faserseile in laufenden Anwendungen am Beispiel eines Regalbediengerätes (RBG) zu untersuchen.

2.1 AiF-GEFÖRDERTES FORSCHUNGSPROJEKT “EINSATZ VON HOCHFESTEN FASERSEILEN FÜR HUBBEWEGUNGEN IN DER LAGERTECHNIK“

Von 2007 bis 2010 wurde in einem ersten Forschungsprojekt die generelle Einsetzbarkeit von nicht-optimierten hochmodularen Faserseilen untersucht [Ern10]. Dazu wurden sowohl Biegeversuche auf am IFT vorhandenen Biegemaschinen durchgeführt, als auch praxisnahe Versuche auf einem Einmast-RBG, das am IFT dafür aufgebaut wurde (Abbildungen 1 bis 3). Das



Abbildung 1. Einmast-RBG am IFT

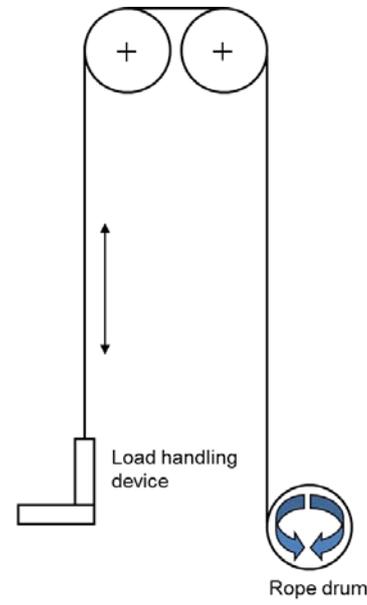


Abbildung 2. Seitenansicht des Einmast-RBGs



Abbildung 3. Biegemaschine am IFT mit Faserseil

RBG besteht aus dem Masten an dem eine Plattform mit dem Prüfungsgewicht auf und ab bewegt wird und dem zugehörigen Steuerungssystem. Der Antrieb besteht aus einem Getriebemotor und einer einlagig bewickelten Seiltrommel, welche sich auf der Rückseite der Maschine befindet. Das zu testende Seil läuft von der Seiltrommel zum Mastkopf im oberen Bereich des RBGs, über zwei Stahlscheiben und wieder nach unten zur Plattform mit dem Prüfungsgewicht, an der das Seil befestigt ist.

Das Ergebnis dieses ersten Forschungsprojektes war die Bestätigung, dass Faserseile in einem RBG sicher und wirtschaftlich eingesetzt werden können. Allerdings mit der Einschränkung, dass spezielle auf Biegebeanspruchung optimierte Faserseile eingesetzt werden müssen, um das volle Potential ausschöpfen zu können.

2.2 ZIM-GEFÖRDERTES FORSCHUNGSPROJEKT „ENTWICKLUNG EINES HOCHFESTEN FASERSEILES FÜR REGALBEDIENGERÄTE“

Anschließend an das erste Forschungsprojekt wurde von 2011 bis 2014 ein zweites Forschungsprojekt durchgeführt, um in Zusammenarbeit mit dem Faserseilhersteller Geo Glestein ein hochmodulares Faserseil zu entwickeln, das in Regalbediengeräten eingesetzt werden kann [Nov14]. Wie im ersten Projekt wurden sowohl Biegeversuche als auch praxisnahe Versuche auf einem RBG durchgeführt. In den Biegeversuchen wurde das Seil um die obere Umlenkscheibe, über die der Antrieb erfolgt, und um

die Prüfscheibe gelegt (Abbildung 3). Die Seilzugkraft wird hierbei über einen Hebel mit gewichtsplatten aufgebracht. Während des Versuches läuft das Seil auf die Prüfscheibe auf und ab und erfährt dabei die Zustände gerade – gebogen – gerade.

In Tabelle 1 sind die Versuchsparameter sowohl für die Biegeversuche als auch für die praxisnahen RBG-Versuche aufgeführt. Das Projekt wurde in mehrere Phasen aufgeteilt, in denen verschiedenste Prüfmuster durch den Seilhersteller hergestellt wurden und vom IFT getestet wurden. In der ersten Phase wurden vier verschiedene Prüfmuster in einer Kombination aus zwei verschiedenen Werkstoffen und

zwei verschiedenen Konstruktionen entwickelt. In der zweiten Phase wurde die Prüfmusterkonstruktion, die keine gute Lebensdauer gezeigt hatte fallen gelassen und die überlegene Seilkonstruktion wurde weiterentwickelt. In den praxisnahen Versuchen auf dem RBG wurden im Anschluss an die Biegeversuche der einzelnen Phasen jeweils die beste Kombination aus Seilkonstruktion und -werkstoff getestet.

In der ersten Phase wurden somit vier Seilmuster entwickelt. Es wurden dabei Prüfmuster in geflochtener und gelegter Seilkonstruktion mit den Werkstoffen HMPE und LCP entwickelt. Die Versuchsergebnisse der ersten Phase zeigten im Biegeversuch eine höhere Lebensdauer für die Prüfmuster in gelegter Konstruktion im Vergleich zu den geflochtenen Seilkonstruktionen. Weiter konnte festgestellt werden, dass die Seile aus dem Werkstoff LCP eine höhere Lebensdauer aufwiesen als die aus HMPE (Abbildung 4). In den folgenden Diagrammen wurde zum Vergleich die mit der Lebensdauerformel von Feyrer [Fey15] für laufende Drahtseile ermittelte Lebensdauer eingetragen. Zur Vereinfachung wurden keine reduzierenden Faktoren, wie zum Beispiel Schrägzug, angewendet.

Tabelle 1. Parameter der Biege- und RBG-Versuche

Bezeichnung	SI-Einheit	Wert
D/d-Verhältnis	-	20
Seilnennendurchmesser	mm	16
Seilzugkraft	kN	20
Sicherheitsfaktor	-	3,5

Comparison of the median lifetime of LCP and HMPE in Wire Rope Construction and Braided Construction

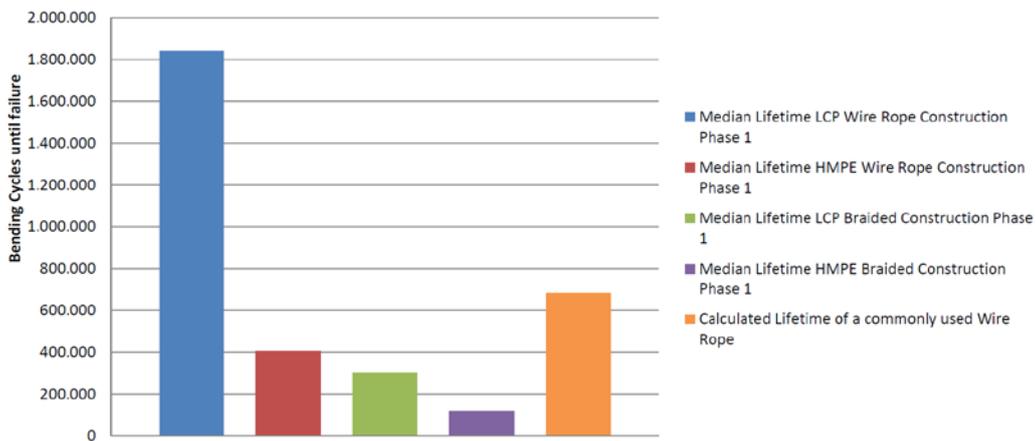


Abbildung 4. Seillebensdauer der getesteten Seile im Biegeversuch in Phase 1

Comparison of the median lifetime of LCP and HMPE in Wire Rope Construction

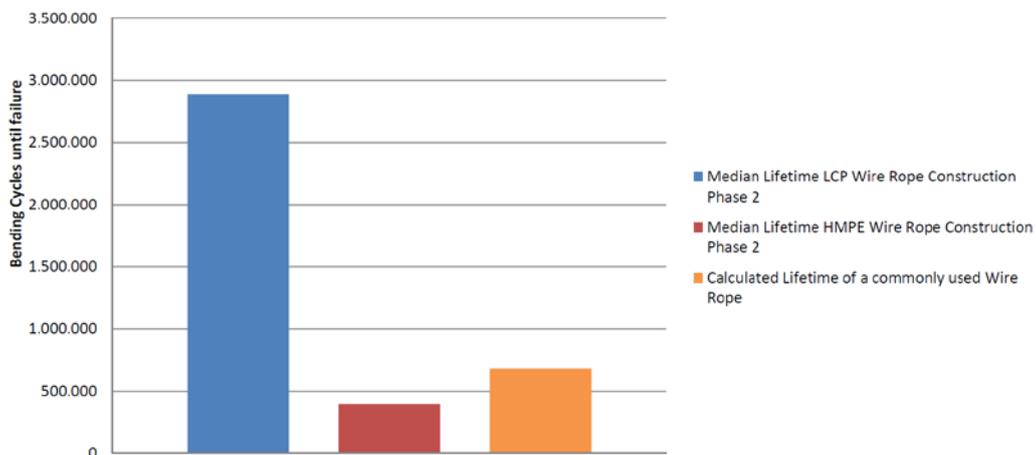


Abbildung 5. Seillebensdauer der getesteten Seile im Biegeversuch in Phase 2

Für die Weiterentwicklung in Phase 2 wurde die gelegte Seilkonstruktion in Kombination mit den Werkstoffen HMPE und LCP gewählt. Wie in Phase 1 zeigten die Seilmuster aus dem Werkstoff LCP eine höhere Lebensdauer als diejenigen aus HMPE (Abbildung 5).

In den praxisnahen Versuchen auf dem RBG konnte die im Biegeversuch erreichte Seillebensdauer nicht erreicht werden. Die getesteten Seile zeigten eine

Restlebensdauer von 18,6 % (Abbildung 6). Dennoch ist die Lebensdauer des Faserseiles höher als die berechnete Lebensdauer des Drahtseiles. Anschließend an die ersten Versuche wurde der Seiltrieb analysiert und die Haupteinflüsse auf die Seillebensdauer bestimmt. Als Einflüsse wurden hierbei Schrägzug und die daraus resultierende Verdrehung des Seiles, die Zugschwellbelastung durch Beschleunigung und Abbremsen und die Rillenrauigkeit identifiziert.

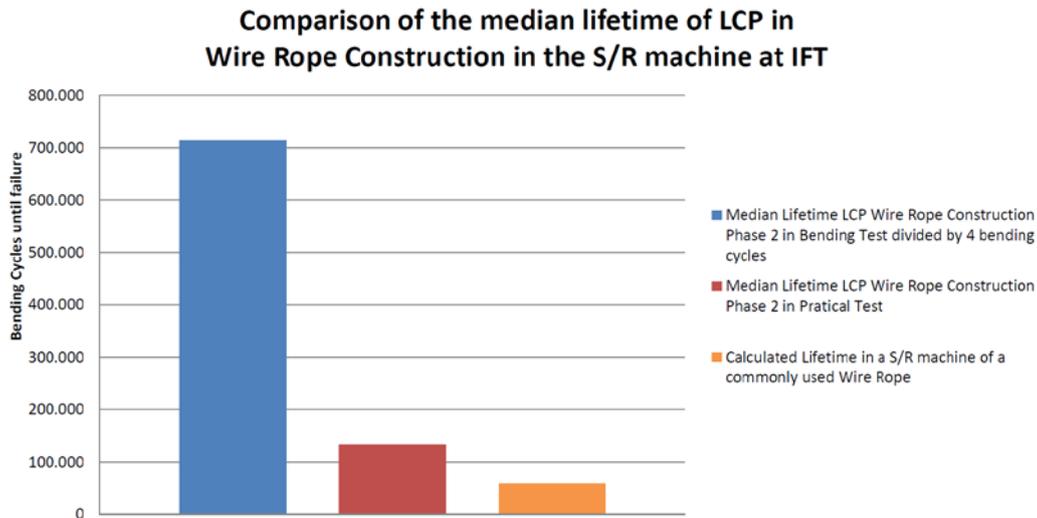


Abbildung 6. Seillebensdauer der getesteten Seile auf dem RBG in Phase 2

3 BESTIMMUNG DER ABLEGEREIFE

3.1 KAMERABASIERTE ABLEGEREIFEERKENNUNG

Zusätzlich zu der Entwicklung eines neuen Faserseiles wurden neue Möglichkeiten erforscht, die Ablegereife laufender hochmodularer Faserseile zu bestimmen [Gae13]. Zum einen wurde eine kompaktere Version des automatisierten visuellen Seilprüfgerätes für Drahtseile Winspect® (Abbildung 7) entwickelt, welches in RBGs eingebaut werden kann. Weiter wurden erste Analysemethoden für die Ablegereifeerkennung untersucht, die mit einem Prototypenaufbau des visuellen Seilprüfgerätes durchgeführt wurden (Abbildung 8).

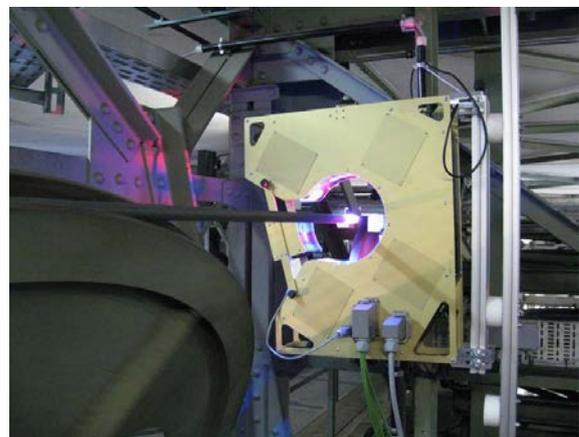


Abbildung 7. Automatisiertes visuelles Prüfgerät Winspect® für Drahtseile



Abbildung 8. Prototypenaufbau des visuellen Seilprüfgerätes im RBG am IFT [NW14]

Zur Bestimmung der Ablegereife wurden drei Analysemethoden untersucht:

- Analyse der Fransenbildung
- Abnahme des Seildurchmessers und Veränderung der Seilstruktur
- Messung der Schlaglängenänderung

Über die Lebensdauer des Seiles werden aufgrund von Abrasion durch den Lauf über die Seilscheiben Fransen auf der Seiloberfläche auftreten (Abbildung 9). Dieses Wachstum, bzw. die Wachstumsrate, könnte dabei als Ablegereifekriterium benutzt werden. Die Anzahl an Fransen auf einer bestimmten Bezugslänge könnte, dabei wie bei Drahtbrüchen bei Stahlseilen, gezählt und analysiert werden. Falls dieses Wachstum der Fransen wiederholbar und statistisch abgesichert erfolgt, kann diese Methode herangezogen werden, die Ablegereife des Seiles zu bestimmen.

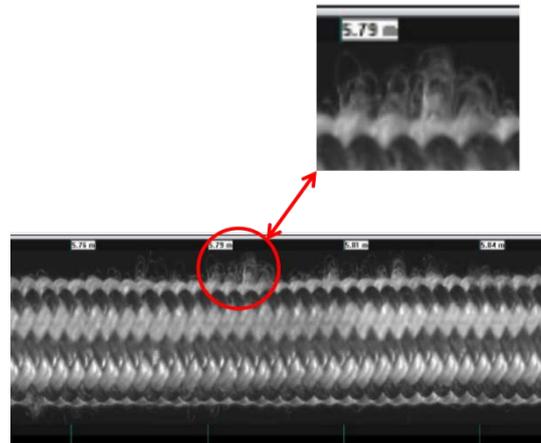


Abbildung 9. Fransen auf der Seiloberfläche, aufgenommen mit dem Prototypenaufbau des visuellen Seilprüfgerätes [NW14]

Die Abnahme des Seildurchmessers oder die Veränderung der Seilstruktur könnte ebenso herangezogen werden, die Ablegereife zu bestimmen. Über die Lebensdauer des Faserseiles wird sich die Seilstruktur aufgrund des Bruchs einzelner Fasern verändern. Zum Ende der Seillebensdauer wird sich hierbei die Struktur immer weiter verändern. Um die Veränderung der Seilstruktur auszuwerten könnten dabei die Maxima und Minima des Seiles über eine bestimmte Bezugslänge aufgenommen und daraus ein Quotient berechnet werden.

Der Flechtwinkel eines Faserseiles wird sich über die Seillebensdauer verändern, da sich das Seil dehnen wird. Drei Bereiche können dabei über die Lebensdauer des Faserseiles beobachtet werden (Abbildung 10). Die erste Phase deckt dabei die ersten Hubzyklen nach dem Seilauflegen ab und ist durch eine starke Zunahme der Seildehnung gekennzeichnet. Die zweite Phase deckt den Großteil der Seillebensdauer, in der es nahezu keine Zunahme der Dehnung gibt ab. Die dritte Phase deckt das Ende der Seillebensdauer ab, bei der es zu einem starken Anstieg der Seildehnung kommt. Kann nun der Beginn dieser dritten Phase sicher und wiederholbar detektiert werden, könnte diese Methode ebenfalls für die Überwachung von Faserseilen herangezogen werden.

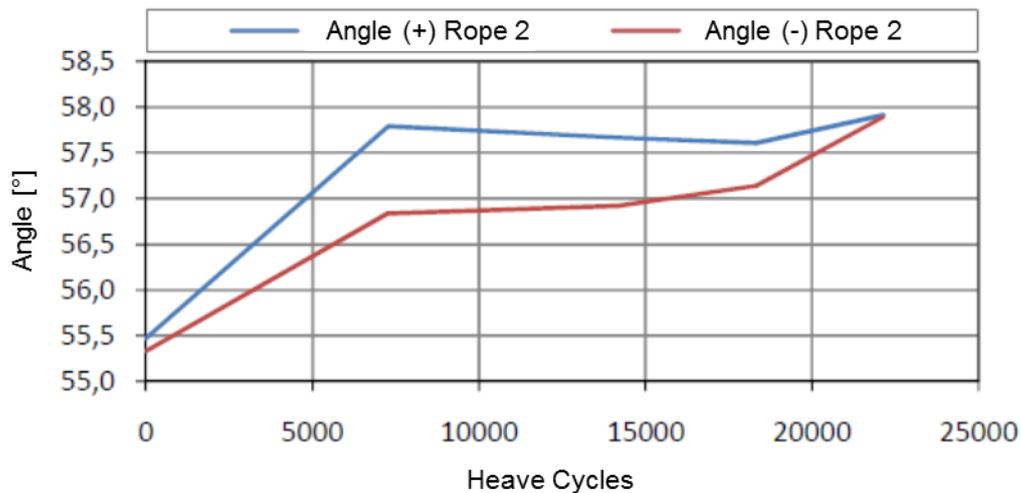


Abbildung 10. Änderung des Flechtwinkels eines Faserseiles über die Seillebensdauer [Gae13]

Alle drei oben genannten Methoden werden in ein neues visuelles Seilprüfgerät für Faserseile integriert, mit dem sowohl kleine Seildurchmesser als auch große Seildurchmesser geprüft werden können (Abbildung 11). Das neue Gerät wird modular aufgebaut sein, so dass nicht wie in der bisherigen mit vier CCD-Kameras geprüft werden muss, sondern es können zum Beispiel auch nur zwei CCD-Kameras genutzt werden. Dies führt somit zu einem kompakteren Aufbau, so dass auch schwer zugängliche Seiltriebe, wie Regalbediengeräte oder Raupenkrane, damit überwacht werden können.

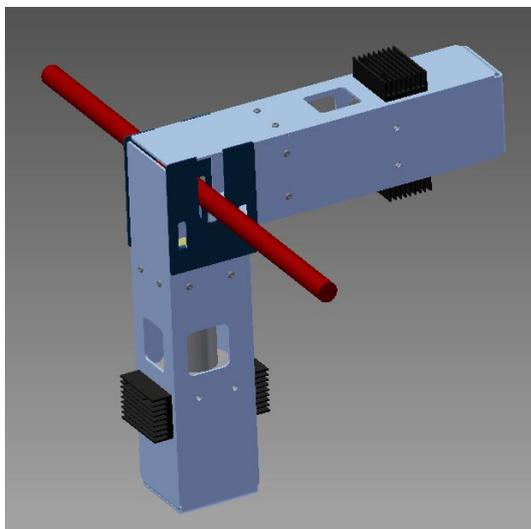


Abbildung 11. CAD-Modell des neuen Seilprüfgerätes für Faserseile [Gae13]

Zu allen drei Ablegereifekriterien müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Vor allem die

Einflüsse der verschiedenen Seilkonstruktionen und -werkstoffen müssen bei unterschiedlichen D/d-Verhältnissen und Seilzugkräften untersucht werden.

3.2 BESTIMMUNG DER ABLEGEREIFE ÜBER DIE SEILDEHNUNG

Ein Kriterium für die Bestimmung der Ablegereife hochmodularer Faserseile kann wie oben beschrieben die Seildehnung sein. Eine Methode diese automatisiert aufzunehmen, könnte über die Messung der zusätzlich auf die Trommel aufgespulten Seillänge mittels eines Drehgebers sein (Abbildung 12). Wie bei der Änderung des Flechtwinkels (siehe Kapitel 3.1) können dabei drei Bereiche beobachtet werden. In einer ersten Phase wird sich das Faserseil stark dehnen um danach in einer zweiten Phase nahezu keine weitere Seildehnung aufzuweisen. Zum Ende der Lebensdauer wird sich das Seil aufgrund inneren Verschleißes und dadurch verursachten Lastumlagerungen in einer dritten Phase wieder anfangen stark zu dehnen. Kann nun der Beginn dieser dritten Phase sicher und wiederholbar für ein bestimmtes Faserseil detektiert werden, könnte diese Methode als ein weiteres Ablegekriterium herangezogen werden.

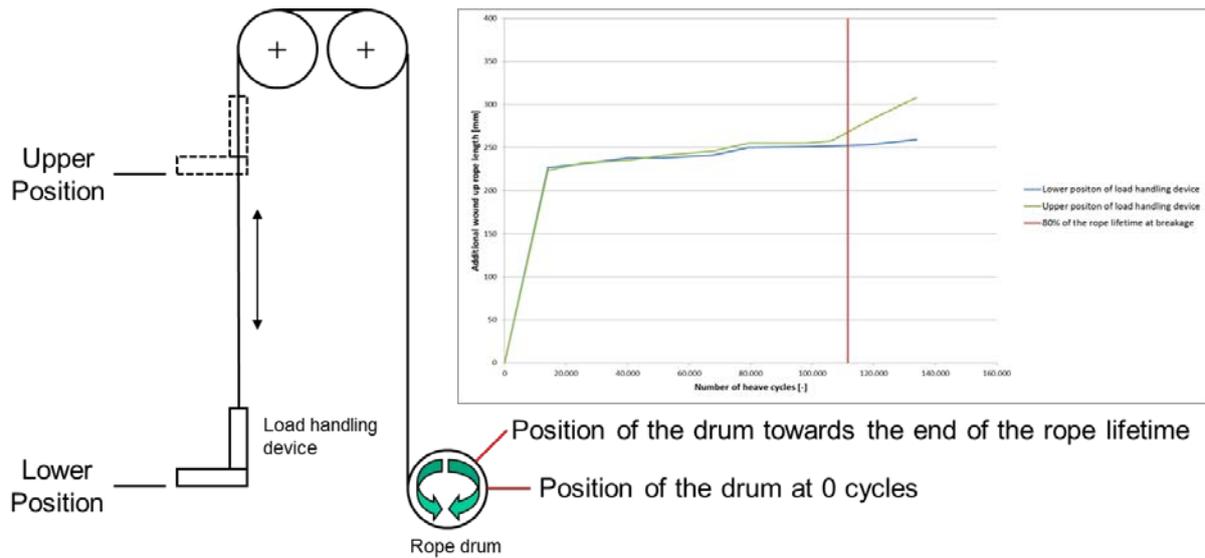


Abbildung 12. Zusätzlich aufgespulte Seillänge aufgrund von Dehnung über die Seillebensdauer

3.3 MULTIDIMENSIONALE AUSWERTUNG DER SEILABLEGEREIFE UNTER VERWENDUNG DER FUZZY-LOGIK

Um einen sicheren Betrieb der Faserseile in laufenden Anwendungen zu ermöglichen, müssen wie in den Kapiteln 3.1 und 3.2 Ablegereifekriterien entwickelt werden und in Kombination genutzt werden. Für Drahtseile existieren mehrere Kriterien, wie die Durchmesserabnahme und natürlich die Drahtbruchzahl auf einer bestimmten Bezugslänge, die alle auch einzeln angewendet werden können. Für Faserseile müssen hingegen mehrere Ablegereifekriterien kombiniert werden, um alle denkbaren Schadensmechanismen abdecken zu können.

Die Auswertung dieser kombinierten Ablegereifekriterien könnte hierbei mit Hilfe der Fuzzy-Logik gemacht werden. Die Fuzzy-Logik basiert dabei auf der Verwendung von "If" – "Then" Beziehungen, bei denen die verschiedenen Kriterien mit logischen Operatoren wie „AND“ verglichen werden. In Abbildung 13 ist ein Beispiel abgebildet, bei dem die Ablegereife im gelben Bereich erreicht wird. Die Logik dazu würde lauten:

IF Fringes=15 AND Extension=8.1 AND Variance of deflection angle=3.2 THEN Discard the rope

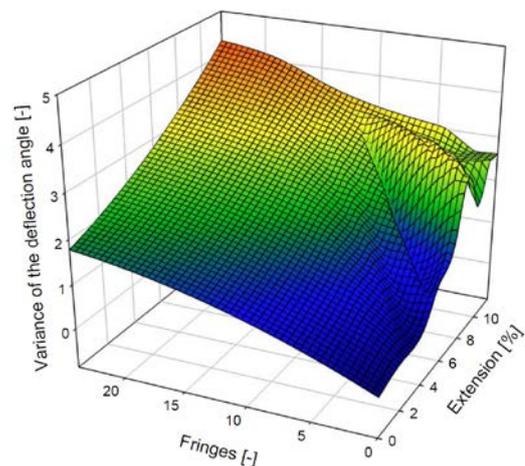


Abbildung 13. Beispiel für eine multidimensionale Auswertung verschiedener Ablegereifekriterien

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Hochmodulare Faserseile haben das Potential in hochbeanspruchten Seiltrieben wie Raupenkrane und Regalbediengeräten als Hubseile eingesetzt zu werden. Dieses Potential ist bereits bekannt und Faserseile sind auch bereits Inhalt verschiedenster Forschungsprojekte. Um Faserseile in einer sicheren und wirtschaftlichen Weise einsetzen zu können ist es notwendig, die Lebensdauer beim Lauf über Scheiben zu wissen. Weiter ist es von außerordentlicher Bedeutung die Ablegereife sicher zu erkennen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Das IFT hat in der Vergangenheit in diesen Bereichen bereits Forschungsarbeit geleistet und wird diese in den nächsten Jahren fortführen.

LITERATUR

- [Ern10] Ernst, B.: Einsatz von hochfesten Faserseilen für Hubbewegungen in der Lagertechnik. AiF-Abschlussbericht. Stuttgart, 2010.
- [Fey15] Feyrer, K.: Wire Ropes. Springer. Berlin, 2015.
- [Gae13] Gaeta, M.: Automatisierte visuelle Prüfung von Faserseilen auf einem Regalbediengerät. Diplomarbeit. Stuttgart, 2013.
- [Hop97] Hoppe, L. F. E.: Performance improvement of Dyneema in ropes. In: Oceans '97 conference proceedings. Conference October 6 - 9 1997. World Trade and Convention Centre. Halifax, Nova Scotia, Canada.
- [McK04] McKenna, H. A.: Handbook of fibre rope technology. CRC Press Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, 2004.
- [NW14] Novak, G., Winter S.: Innovatives Regalbediengerät mit hochfesten Faserseilen als Hubseile. Präsentation Logimat. 25. – 27. Februar 2014. Stuttgart, 2014.
- [Nov14] Novak, G.: Entwicklung eines hochfesten Faserseiles für Regalbediengeräte. ZIM-Abschlussbericht. Stuttgart, 2014.
- [Sam14] Samson Ropes: Samson Ropes KZ100. Datenblatt. Ferndale, 2014.
- [Tor10] Torben, S.: Field pilot of deep water installation in two-fall using fiber rope. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010 Proceedings. Conference September 13 - 16 2010. Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute. Rio de Janeiro, Brasilia.
- [Vog98] Vogel, W.: Dauerbiegeversuche an gedrehten und geflochtenen Faserseilen aus hochfesten Polyethylenfasern. Technische Textilien, 41. Jahrgang, 1998, Nr. 3, S. 126 - 128.

Dipl.-Ing. Gregor Novak, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart.

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Holzgartenstrasse 15B, 70174 Stuttgart

Telefon: +49 711 685-83693, Fax: +49 711 685-83769, E-Mail: gregor.novak@ift.uni-stuttgart.de