

Schadensanalyse hochfester Faserseile

Failure analysis of high-strength fiber ropes

Annett Schmieder
Thorsten Heinze
Markus Michael

Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Technische Universität Chemnitz

Bis heute werden in Unstetigförderern, wie Kränen und Aufzügen, fast ausschließlich Stahldrahtseile und Stahlketten eingesetzt. Gleichwohl weisen diese Zugmittel wesentliche Nachteile, wie z. B. eine hohe Eigenmasse, geringe Biegeflexibilität und Korrosionsempfindlichkeit, auf. Um den stetig wachsenden Anforderungen insbesondere im Bereich der „laufenden Seile“ gerecht werden zu können, müssen alternative Zugmittel, unter Verwendung neuer Technologien und Werkstoffe, entwickelt und durch systematische Untersuchungen zur Serienreife geführt werden. Hochfeste Faserseile weisen bereits heute vielversprechende mechanische Eigenschaften hinsichtlich Zugfestigkeit, Schwingungsverhalten und Biegewechselfestigkeit auf. Dennoch ist ihr Einsatz aufgrund fehlender systematischer Untersuchungen, unzureichender Dimensionierungsgrundlagen sowie fehlender Verfahren zur Ablegereifeerkennung, zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Mit Hilfe neuer Techniken und Verfahren, wie beispielsweise einer Mehrzonenbiegewechselmaschine für die Seilprüfung und der Computertomographie für die Seilanalyse sollen neue Erkenntnisse über das Verschleißverhalten von Faserseilen gewonnen und daraus abgeleitet neue Seilkonstruktionen sowie Ablegereife entstehen.

[Schlüsselwörter: Faserseile, Schadensanalyse, Computertomographie, Biegewechseluntersuchung, Ablegereife]

Up to date, wire ropes and steel chains have been used almost exclusively as means of transmission, connection and security elements in intermittent conveyors, such as cranes and lifts. However, these elements have several disadvantages, like high net mass, low bending flexibility and corrosion sensitivity. In order to comply with new requirements, there is a need to study and develop textile ropes and belts. By using the latest techniques and methods like computed tomography, science is able get knowledge about the lifetime of fiber ropes.

[Keywords: fiber ropes, analysis, computer tomography, lifetime]

1 HOCHFESTE FASERSEILE

1.1 STAND DER TECHNIK

Die Präferenz von Stahldrahtseilen und -ketten begründet sich vor allem in ihrem hohem Lastaufnahmevermögen und hoher Betriebssicherheit. In Verbindung mit stetig wachsenden Anforderungen an Produktivität, Sicherheit und Umweltbewusstsein ergeben sich neue Erfordernisse hinsichtlich der Werkstoffe und Zugmittelkonstruktionen. Diese Anforderungen sind jedoch nicht mehr ausschließlich durch Stahldrahtseile und Ketten zu erfüllen. Sogenannte HM-HT-Faserseile (engl.: high modulus – high tenacity fibre ropes) stellen hier, aufgrund ihrer günstigen Zugfestigkeits-/Masse-Relation eine vielversprechende Alternative dar. Entscheidende Vorteile bringen die HM-HT-Faserseile insbesondere bei großen vertikalen Abspann- oder Förderlängen. (vgl. Abbildung 1), da in diesen Anwendungen wesentlich größere Nutzlasten und/oder Förderlängen infolge der eingesparten Seilmasse erzielt werden können.

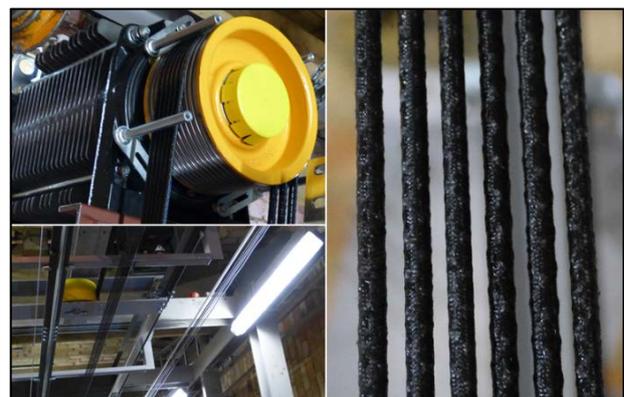


Abbildung 1. Aufzug mit Faserseil (Fa. Brobeil)

So lassen sich bereits heute Faserseile herstellen, die gegenüber Stahldrahtseilen eine vergleichbare oder höhere Zugfestigkeit und dabei eine um 75 bis 80 % geringere Seilmasse aufweisen. Gleichwohl bestehen zahlreiche Fragestellungen hinsichtlich Langzeitverhalten, werkstoffgerechter Dimensionierung und vor allem der Erkennung der Ablegereife, die ihnen derzeit den Zugang zu

sicherheitsrelevanten Anwendungen der Fördertechnik verwenden. [H13], [HBSK], [W05]

1.2 PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSWEG

Beim Lauf über Scheiben und Trommeln entsteht eine fortschreitende Schädigung der Seile (Abbildung 2), die insbesondere das Resultat aus Werkstoffermüdung, Faserknickung und abrasiven Verschleiß ist. Seile sind demzufolge nicht dauerfest. Befindet sich ein Seil in einem Zustand, in dem ein sicherer Betrieb nicht mehr gewährleistet werden kann, wird von der „Ablegereife“ gesprochen.



Abbildung 2. Computertomografie-Aufnahme eines biege-wechselbeanspruchten Faserseils

Ablegekriterien, d. h. Merkmale die diesen Zustand anzeigen sollen, existieren sowohl für Stahldrahtseile (vgl. VDI 2358, DIN 15020) als auch für Faserseile (VDI 2500, DIN EN ISO 9554). Allerdings ist ein Großteil der für Faserseile festgelegten Ablegekriterien nur schwer in die Praxis überführbar und somit die Möglichkeiten kritische Zustände sicher zu erkennen, begrenzt. Nach VDI 2500 ist ein Faserseil u. a. abzulegen, wenn der „Bruch von mehr als 10 % der Garne des Seilquerschnittes“ vorliegt. Die Richtlinie legt jedoch nicht fest, in welchem Bereich die Schädigung eingetreten sein muss, bzw. wie die Schädigung (Kern-Mantelseil) zu ermitteln ist.

Um Faserseile in förder-technischen Anwendungen einsetzen zu können, müssen die Schädigungsmechanismen umfassend erforscht und daraus abgeleitet neue Ablegekriterien sowie konstruktive Maßnahmen zur Lebensdauersteigerung bzw. zur besseren Erkennung des Seilzustandes aufgestellt werden, Abb. 3.



Abbildung 3. Lösungsweg

Im Rahmen der Forschungstätigkeit an der Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente der TU Chemnitz wurde deshalb ein umfangreiches Versuchsprogramm zur Schadensanalyse von Faserseilen aufgesetzt. Die labormäßige Alterung handelsüblicher und auch neuentwickelter Seile erfolgte an einer Dauerbiegemaschine -- die Seilabschnitte mit definiertem Alterungszustand erzeugt. Auf die Seilproben wurden sowohl zerstörungsfreie (z. B. Auflichtmikroskopie) als auch zerstörende Analyseverfahren (z. B. Restbruchkraftermittlung) angewendet und deren Eignung zur Beurteilung des Gebrauchszustandes von Faserseilen bewertet. [E99], [P11], [W05]

1.3 FUNKTIONALISIERUNG DER SEILKONSTRUKTION

Handelsübliche HM-HT-Faserseile sind konstruktionsseitig nicht optimal an die Anforderungen in förder-technischen Anwendungen angepasst. Darüber hinaus weisen sie nur selten Erkennungsmerkmale auf, die Veränderungen in der Seilkonstruktion oder den mechanischen Eigenschaften anzeigen (vgl. Abbildung 4).

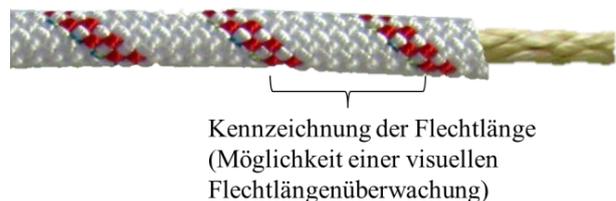


Abbildung 4. Stand der Technik Faserseile

An der TU Chemnitz wurde eine Seilkonstruktion (Abbildung 5) entwickelt, die einerseits stärker an die Anforderungen „laufender Seile“ anpasst ist und andererseits Sensorik und weitere Erkennungsmerkmale aufweist, die Aufschluss über Seilschädigungen geben sollen.



Abbildung 5. Seilneuentwicklung

Durch optische Sensorfäden sowie farblich gekennzeichnete Seillitzen in Kern und Mantellage können u. a. Seilverdrehungen, Aufstauchungen, Mantelverschiebungen und Flechtlängenänderungen detektiert werden, Abbildung 6.

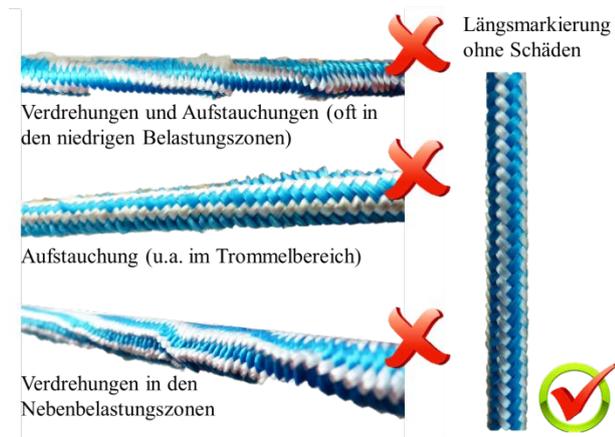


Abbildung 6. Aufschluss über Schädigungseffekte mittels Längsmarkierung

Neben den visuellen Überwachungsmöglichkeiten wurden zudem elektrisch leitfähige Sensorfäden zur Erfassung einer verschleißbedingten Widerstandsänderung sowie röntgenpositive Kontrastfäden zur Analyse mittels Computertomografie in die Seilkörper eingebaut.

2 DAUERBIEGEVERSUCHE

Um Aussagen bezüglich der Alterung und damit der Ablegereife treffen zu können, werden Seile labormäßig auf ihre Biegewechselfestigkeit untersucht und bewertet.

Bei konventionellen Dauerbiegemaschinen wird das Seil i. d. R. unter einer konstanten Last über eine Testscheibe hin- und her gebogen bis einzelne Litzen oder das gesamte Seil versagen. Im Ergebnis des Versuches erhält man die Bruchbiegewechselzahl. Weiterführende Erkenntnisse über das Verschleißwachstum und die Veränderung der mechanischen Eigenschaften im Laufe des Versuches und damit des Lebenszyklus werden nicht gewonnen. Die Schadensanalyse und vor allem die Ablegereifeerkennung zielen jedoch auf Kriterien ab, die einen Zustand beschreiben, weit vor dem eigentlichen Versagenszeitpunkt. [H13]

Bei früheren Untersuchungen an der TU Chemnitz wurden Seile einer in Relation zur mittleren Bruchbiegewechselzahl stehenden Biegewechselbeanspruchung (z. B. 20% \bar{N}_B) ausgesetzt. Dieses Vorgehen setzt einen statistisch abgesicherten Mittelwert der Bruchbiegewechselzahlen voraus und kann dennoch, aufgrund der relativ großen Streubreite der Messwerte, nicht gewährleisten, dass der Relativwert für das getestete Seil richtig ist.

Aus dieser Problemstellung heraus wurde eine 5-Zonen-Biegemaschine (vgl. Abbildung 7) beschafft, die Seilabschnitte erzeugt, die unterschiedlich oft gebogen wurden und dabei definierte Alterungszustände bezogen auf den Lebenszyklus des getesteten Seiles (Bruchbiegewechselzahl) aufweisen.

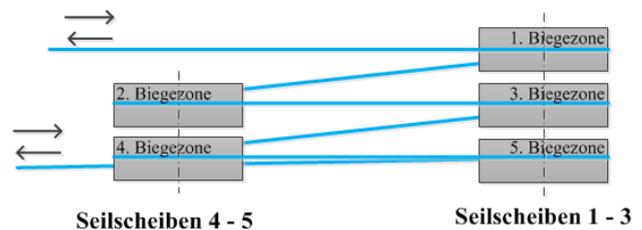


Abbildung 7. Schema 5-Zonen-Biegewechselmaschine

Das Testseil wird auf der Biegewechselmaschine – unidirektional – über fünf baugleiche Seilscheiben gebogen, wodurch Biegezone mit 0%, 20%, 40%, 60%, 80% und 100% der jeweiligen Bruchbiegewechselzahl entstehen. Läuft das Seil beispielsweise über zwei der fünf Scheiben, so hat es 40% der im Versuch ermittelten Bruchbiegewechselzahl ertragen.

In Abbildung 8 sind beispielhaft Verschleißaufnahmen eines an dieser Biegemaschine getesteten Seiles dargestellt, die das nichtlineare Verschleißwachstum während des Lebenszyklus des Seiles dokumentieren.

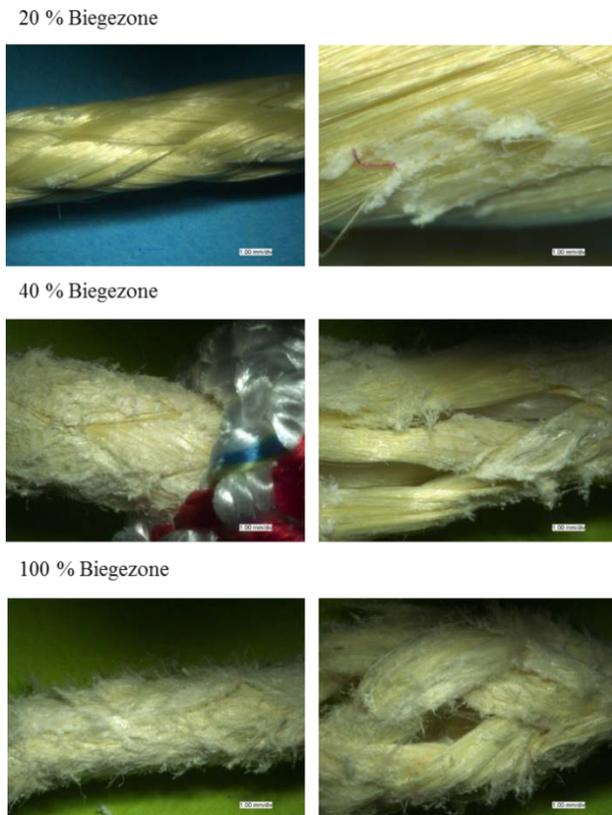


Abbildung 8. Verschleißwachstum

3 SCHADENSANALYSE UND DEREN AUSWERTUNG

In Folge der Biegewechselbeanspruchung eines Faserseiles werden die Bindungskräfte der Kettenmoleküle gelockert beziehungsweise gelöst (Fibrillierung der Faser). Einzelne Fibrillen brechen aus den Fasersträngen heraus und reduzieren die Reißfestigkeit des Seiles aufgrund des verminderten tragenden Querschnittes und der erhöhten Knickempfindlichkeit. Aus dem Faserabrieb (fibrilläre Faserreste) und der Schlichte (Verarbeitungshilfe auf der Faser) bildet sich durch die Relativbewegungen der Seilkomponenten ein Verbund aus, der als zusätzlicher Abrasivstoff wirken kann. Im Zusammenspiel der einzelnen Schädigungsmechanismen und der sie auslösenden Schädigungsparameter führt die fortschreitende Schädigung schließlich zum Versagen der Seilstruktur.

Um die benannten Schädigungseffekte erfassen zu können, wird in der Schadensanalyse ein ausführliches „Schadensbild“ vom Testseil sowie dessen Umfeld erstellt, hinsichtlich Schadensart bzw. Schadensursache bewertet und schließlich Rückschlüsse auf die Lebensdauer bzw. Ablegereife gezogen, Abbildung 9.

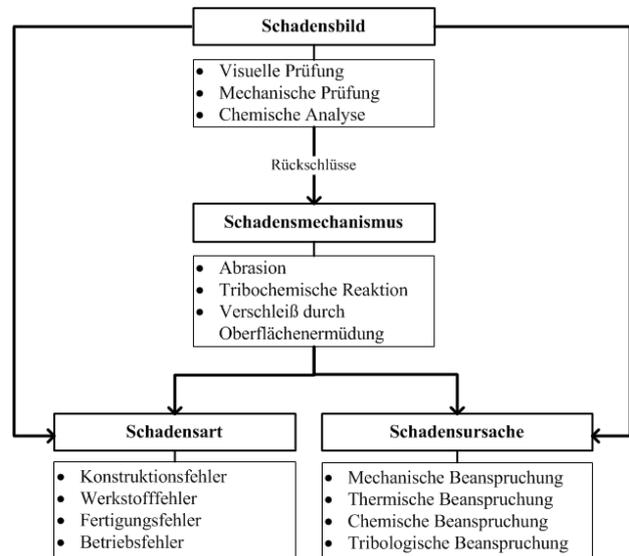


Abbildung 9. Ablauf einer Schadensanalyse[SS89]

Die Wahl des Analyseverfahrens richtet sich einerseits nach dem zu untersuchenden Schädigungsmechanismus, dem Untersuchungsaufwand sowie der geforderten Genauigkeit und andererseits nach der Art der Untersuchung. Dient die Schadensanalyse der Charakterisierung von Schäden und der Schaffung von Verschleißkennwerten, können zerstörende Analyseverfahren, wie die Restbruchkraftermittlung und Schliffbilddokumentation eingesetzt werden. Demgegenüber sind bei der Zustandsüberwachung laufender Seile lediglich zerstörungsfreie Verfahren, wie die Computertomografie geeignet. [SS89]

3.1 MIKROSKOPIE

Mit Hilfe der Auflichtmikroskopie lassen sich hochauflösend kleinste Fibrillierungen bzw. Deformationen der Filamente sichtbar machen, Abbildung 10. Das Analyseverfahren ermöglicht jedoch nur eine äußerliche Betrachtung des Prüfobjektes. Dadurch ist sehr häufig ein Öffnen und aufwändiges Präparieren (Schliffbilder) der Seilstruktur erforderlich, um u. a. Aussagen über den inneren Verschleiß treffen zu können. Weiterhin bedingt eine hohe Auflösung sehr kleine Objektgrößen, weshalb mehrere Abschnitte und Bereiche einer Struktur untersucht werden müssen, um ein aussagefähiges Gesamtbild zu erhalten.

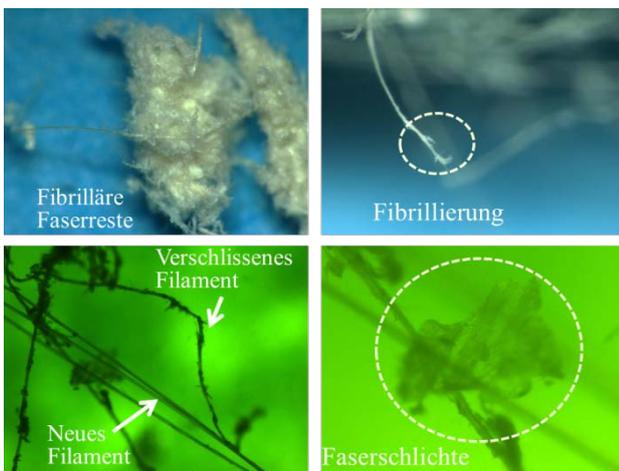


Abbildung 10. Verschleißmerkmale

3.2 COMPUTERTOMOGRAFIE

Mit Hilfe der Computertomographie (CT-Technik) kann der Verschleiß im Inneren einer Struktur sichtbar gemacht werden (vgl. Abbildung 11), ohne die Struktur zu öffnen und zusätzlich zu schädigen. Bei diesem Analyseverfahren werden Röntgenstrahlen auf das Prüfobjekt gerichtet und durch Absorption und Streuung, in Abhängigkeit der Dichte sowie der Objektstärke geschwächt. Durch die unterschiedlichen Intensitäten und einer mehrdimensionalen Bestrahlung kann schließlich ein räumliches Bild des Prüfobjektes erstellt werden. Das Verfahren eignet sich u. a. zur Charakterisierung der Seilkonstruktion, zur Qualitätskontrolle sowie der Beurteilung des Verschleißes, insbesondere in äußerlich nicht sichtbaren Bereichen des geschädigten Seils. [B05], [G07]

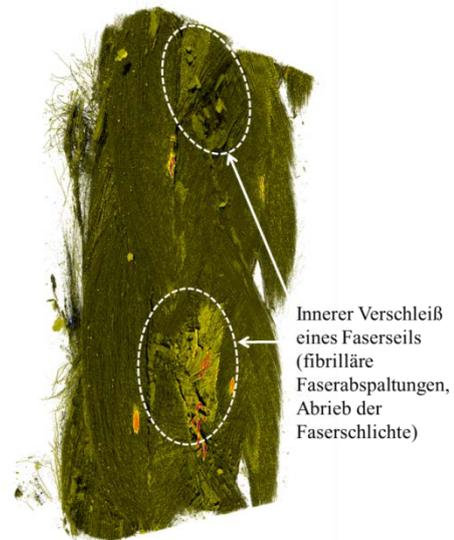


Abbildung 11. Längsschnitt eines verschlissenen Faserseils

Durch dieses zerstörungsfreie Analyseverfahren gelingt es einzelne Seilabschnitte aber auch einzelne Komponenten daraus, räumlich zu betrachten und hinsichtlich ihres Verschleißzustandes zu beurteilen. Die Gefahr einer Verfälschung des Seilzustandes infolge der Probenpräparation besteht nicht. In Abbildung 12 ist eine CT-Aufnahme eines neuen Kern-Mantel-Seils erzeugt worden.

Schnittbild eines neuen Kern-Mantel-Seils

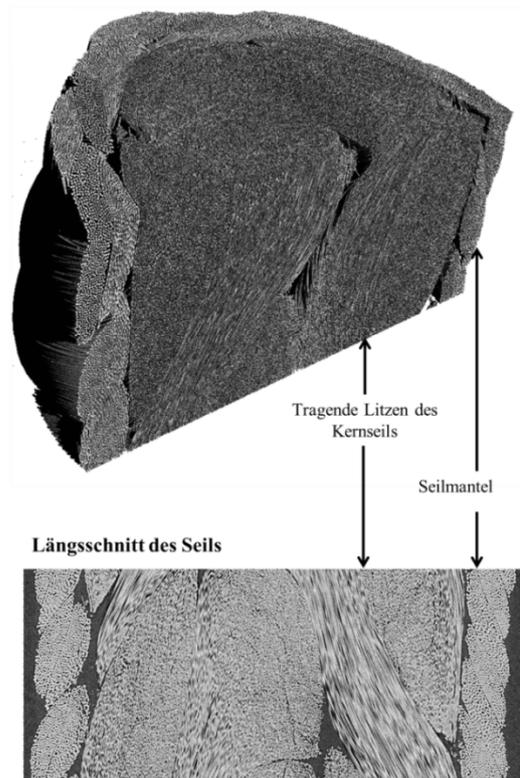


Abbildung 12. CT-Aufnahme eines Kern-Mantel-Seils

Im Längsschnitt des neuen Faserseils ist einerseits eine weitestgehend gleichmäßige Anordnung der Litzen jedoch andererseits auch eine Inhomogenität des Kraftflusses erkennbar. Somit lässt sich bereits im Vorfeld eines Versuches bzw. eines realen Einsatzes, Aussagen über die Qualität des Seiles und letztlich der zu erwartenden Lebensdauer treffen.

In einem bereits gelaufenen Faserseil (vgl. Abbildung 13) sind zudem signifikante Veränderungen im Seilkörper, wie Verschiebungen und Verformungen der Litzen aber auch Faserabrieb und Faserbrüche im Bereich der Überkreuzungsstellen der Litzen erkennbar.

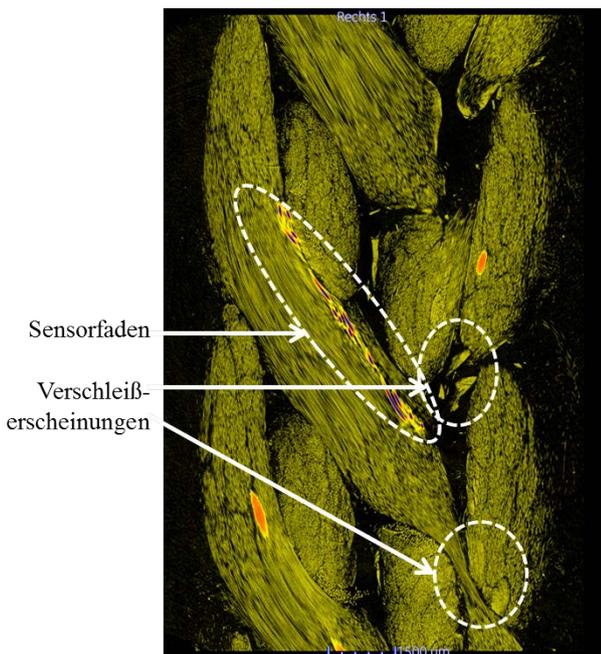


Abbildung 13. Längsschnitt durch ein verschlissenes Seil

3.3 KENNWERTE

Bei der zerstörenden Materialprüfung konnte ein deutlicher Festigkeitsverlust des Kernseiles (vgl. Abbildung 14) mit zunehmender der Biegewechselzahl gemessen werden. In Folge der Biegebeanspruchung des Seiles verschleißt zunächst der lasttragende Kern im Inneren und führt schließlich zum vollständigen Versagen.

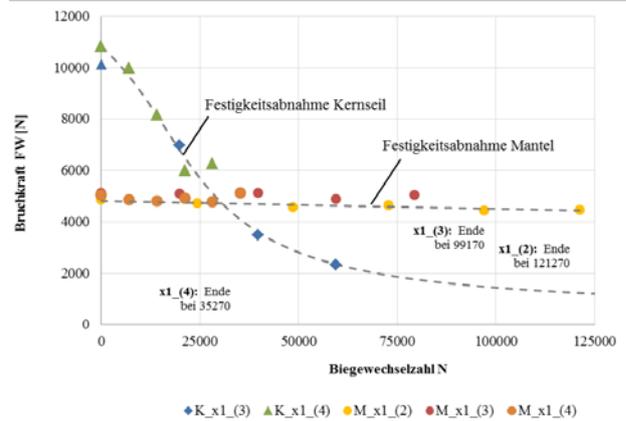


Abbildung 14. Bruchkraft

Wie in Abbildung 14 zu erkennen, hat hingegen die Bruchkraft des Mantels in den einzelnen Biegezonen kaum abgenommen, was darauf zurückzuführen ist, dass der Mantel bei noch intaktem Kernseil kaum am Kraftfluss beteiligt ist. In Abhängigkeit der Seilkonstruktion kann die tragende Funktion jedoch kurzzeitig durch den Mantel übernommen werden (Notlaufeigenschaft).

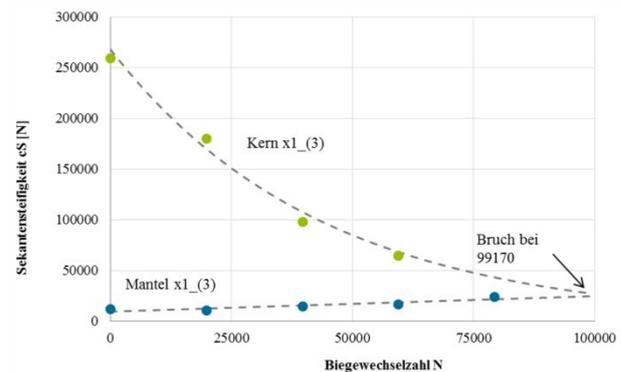


Abbildung 15. Sekantensteifigkeit

Die Auswertung der Sekantensteifigkeit (vgl. Abbildung 15) spiegelt die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des Funktionsverlustes des lasttragenden Kern-Seiles und des allmählich am Kraftfluss beteiligten Mantels ebenfalls wieder. Das Steifigkeitsverhalten biegebeanspruchter Faserseile ist damit hinsichtlich der Beurteilung des Seilzustandes bzw. der Ablegereifeerkennung aussagefähig. Wesentlicher Vorteil gegenüber einer Restbruchkraftermittlung besteht bei dieser Kenngröße in der Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung beispielsweise im Rahmen einer Seilinspektion.

Eine weitere indirekte Möglichkeit das Verschleißverhalten der Faserseile zu detektieren besteht in der Verwendung von Sensorfäden, die in die Seilstruktur integriert werden. (vgl. Abschn. 1.3). So konnte u. a. gezeigt werden, dass Kontrastfäden (vgl. Abbildung 16) zur Auswertung des Verschleißzustandes geeignet sind. Diese ha-

be aus heutiger Sicht keinen signifikanten Einfluss auf das mechanische Verhalten des Faserseils. Die Kontrastfäden sind bereits bei niedriger Strahlenintensität gut sichtbar. In Verbindung mit einem ausgeprägten und leichter zu bewertenden Verschleißwachstum, eignen sie sich, Schlussfolgerungen über den Seilzustand zu ziehen.

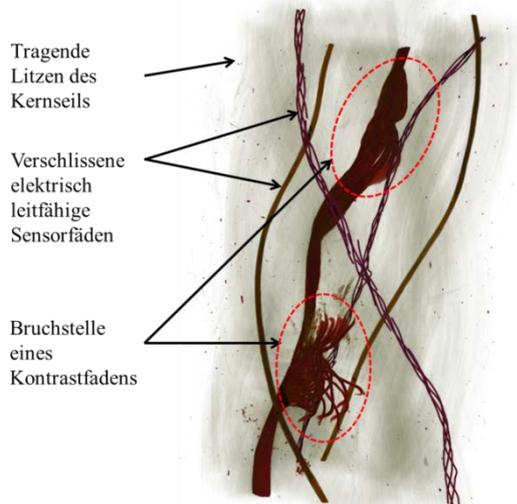


Abbildung 16. CT-Aufnahme eines verschlissenen Faserseils mit Sensorfäden

Unter Verwendung elektrisch leitfähiger Sensorfäden war es weiterhin möglich den elektrischen Widerstand während der Biegewechselbeanspruchung des Faserseils zu messen, Abbildung 17. Erste Untersuchungen dazu haben gezeigt, dass mit zunehmender Biegewechselzahl, die einzelnen Elemente des Sensors verschleßen und ein erhöhter elektrischer Widerstand zu messen ist. Die elektrisch leitfähigen Komponenten in den Litzen wurden ebenfalls so positioniert, dass sie nicht zum zusätzlichen Verschleiß des Seils beigetragen.

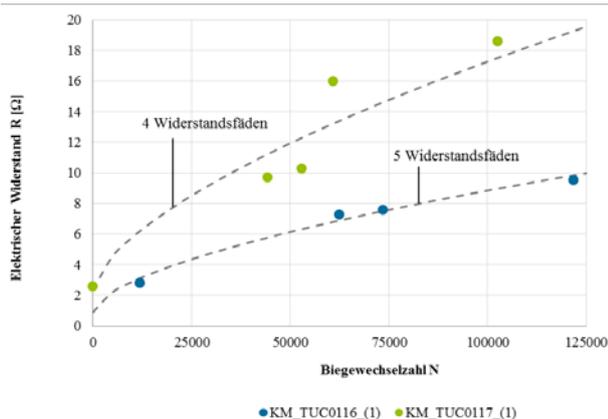


Abbildung 17. Widerstandsmessung

4 ZUSAMMENFASSUNG

In Forschungsarbeiten an der TU Chemnitz wurden an einer 5-Zonen-Biegewechselsmaschine Seilproben erzeugt, die definierte Alterungszustände bezogen auf den Lebenszyklus des getesteten Seils (Bruchbiegewechselzahl) aufwiesen. Mit Hilfe der CT-Technik und integrierter Sensorfäden wurden verschiedene Schäden im Seil detektiert und Erkenntnisse über die Verschleißursachen gewonnen. Die verwendete CT-Technik bietet aufgrund ihrer dreidimensionalen Bildverarbeitung und der zerstörungsfreien Prüfung völlig neue Möglichkeiten für die Analyse von inneren Seil-Strukturen. Außerdem konnte an elektrisch leitfähigen Sensorfäden eine Widerstandsänderung über den Lebenszyklus des Faserseils festgestellt werden, die als mögliches Ablegkriterium zu sehen ist.

Literatur

[B05] Buzug, T. M.: Einführung in die Computertomographie. Springer-Verlag, 2005

[E99] Ehrenstein, G. W.: Polymerwerkstoffe. Hanser-Verlag, 1999

[G07] Grillenberger, A.; Fritsch, E.: Computertomographie. Facultas Verlag, 2007

[H13] Heinze, T.: Dissertation. Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus Polymerfasern, Technische Universität Chemnitz, 2013

[HBSK] Heinze, T.; Berbig, I.; Speck, M.; Kunz, M.: Leistungsfähige Seile für die Fördertechnik. Technische Universität Chemnitz

[P11] Putzke, E.: Diplomarbeit. Untersuchung von Polymermodifikationen für deren Einsatz in synthetischen Fasern, Technische Universität Chemnitz, 2011

[SS89] Schmitt-Thomas, K. G.; Siede, R.: Technik und Methoden der Schadensanalyse. VDI Verlag, 1989

[VW04] Vogel, W.; Wehking, K.-H.: Hochfeste, laufende Faserseile in der Fördertechnik und Logistik. EUROSEIL, 2004

[W05] Wehking, K.-H.: Laufende Seile. Expert Verlag, 2005

Dipl.- Ing. (FH) Annett Schmieder, M. Sc., scientist at the Professorship Technical Textiles – Textile mechanical compounds.

Address: Technische Universität Chemnitz, Professorship Technical Textiles – Textile mechanical compounds, Reichenhainerstr. 70, 09126 Chemnitz, Germany, Phone: +49 +49 371 531-33 89 2, Fax: +49 371 531-833 89 2, E-Mail: annett.schmieder@mb.tu-chemnitz.de

Dr.- Ing. Thorsten Heinze, scientist at the Professorship Technical Textiles – Textile mechanical compounds.

Address: Technische Universität Chemnitz, Professorship Technical Textiles – Textile mechanical compounds, Reichenhainerstr. 70, 09126 Chemnitz, Germany, Phone: +49 +49 371 531-35 84 5, Fax: +49 371 531-835 84 5, E-Mail: thorsten.heinze@mb.tu-chemnitz.de

Prof. Dr.- Ing. Markus Michael, Endowed Professorship Technical Textiles – Textile mechanical compounds.

Address: Technische Universität Chemnitz, Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente, Reichenhainerstr. 70, 09126 Chemnitz, Germany, Phone: +49 +49 371 531-32 34 0, Fax: +49 371 531-832 34 0, E-Mail: markus.michael@mb.tu-chemnitz.de