

Ablegereifeerkennung hochfester, laufender Faserteile mittels elektrischer Widerstandsmessung

Lifetime detection of running, high-strength fibre ropes based on electrical resistance measurement

Annett Schmieder, Markus Golder

Fakultät für Maschinenbau
Professur für Förder- und Materialflusstechnik,
Technische Universität Chemnitz

Steigende Anforderungen an ein energieeffizientes und ressourcenschonendes Betreiben von Fördermaschinen und deren Komponenten führten in den letzten Jahren zu wachsenden Innovationen hinsichtlich neuer Materialien, Technologien und Verfahren. Dies führte insbesondere beim Betreiben von Seiltrieben zu einem Umdenken von etablierten Stahldrahtseilen zu Hochleistungsfaserseilen. Die TU Chemnitz befasst sich u. a. mit der Entwicklung neuer Prüfmethode zur Abschätzung der Lebensdauer und des Gebrauchszustandes von laufenden, hochfesten Faserseilen auf Basis von der elektrischen Widerstandsmessung. Hierfür werden u. a. elektrisch leitfähige Drähte in ein Aramid-Seil integriert, um mittels der gemessenen Änderung des elektrischen Widerstands über die Seillebensdauer die Ablegereife des Seils bestimmen zu können. Mit zunehmender Seillebensdauer brechen die Drähte im Seilinneren und kontaktieren sich stets neu (nur bei unisolierten Drähten), so dass dies zur Erhöhung des elektrischen Widerstands führt.

[Schlüsselwörter: Hochleistungsfaserseile, elektrischer Widerstand, Ablegereife, CBOS-Test]

In recent years the increasing requirements for energy-efficient and resource-saving operation of conveyor machines and their components have led to growing innovations in new materials, technologies and processes. This leads to a rethink of established steel wire ropes to high-performance fibre ropes, especially when operating rope drives. The TU Chemnitz research on the development of new test methods for estimating the service life and condition of use of running, high-strength fibre ropes based on the electrical resistance measurement. For this electrically conductive wires are integrated in an aramid rope in order to be able to determine discard criteria of the rope by measuring the change in electrical resistance over the service life time of the rope. With increasing life time of the ropes, the wires inside the rope break and go into new contacts (only unisulated wires), this leads to an increase in electrical resistance.

[Keywords: high-performance fibre ropes, electrical resistance, discard criteria, CBOS-test]

1 EINLEITUNG



Abbildung 1. Kran (Neuseeland)

Stahldrahtseile in intermittierenden Förderern, wie Kranen und Aufzügen haben sich durch hohe Bruchkräfte und Betriebssicherheiten sowie langjährige Erfahrungen als Verbindungs-, Übertragungs- und Sicherheitselemente sich auf den Markt etabliert, vgl. Abbildung 1. Sie weisen jedoch Nachteile, wie eine hohe Eigenmasse, geringe Biegeelastizität und eine Korrosionsempfindlichkeit auf. Dem geschuldet traten textile Maschinenelemente in Form von HM-HT-Faserseilen (engl.: high modulus – high tenacity) in den Fokus der Betrachtungen. Besonders vorteilhaft dieser HM-HT-Faserseile sind ihre günstigen Bruchkraft-Masse-Verhältnisse, welche ein hohes Potential als Alternative zu den Stahldrahtseilen darstellen [He13, Mi11, Be18, Pu11, Ma15].

Ziel der Forschungsarbeiten der TU Chemnitz ist es, den Wissensstand hinsichtlich des Verschleiß- und Alterungszustandes und Einflussgrößen auf die Lebensdauer und Kriterien zur Ablegereifeerkennung hochfester Faserseile zu erweitern und Methoden zur Lebensdauererkennung daraus abzuleiten bzw. zu entwickeln.

2 PROBLEMSTELLUNG

Kenntnisse bzw. Berechnungen zur Seillebensdauer sind insbesondere beim Betreiben von Seiltrieben wichtige Faktoren beim Thema Sicherheit. Stahldrahtseile sind diesbezüglich bereits gut erforscht und weisen langjährige Erfahrungen auf. Stahldrahtseile werden bei Verschleiß an den Seilendbefestigungen, Lockerung der Drähte, Ermüdungsdrahtbrüchen, Korrosion, einer Reduzierung des metallischen Querschnittes, einem Abrieb an den Seilen und massiven Veränderungen abgelegt bzw. ausgetauscht. Sobald der Zustand eines Stahldrahtseiles nicht mehr mit den üblichen Methoden und Verfahren zur Prüfung beurteilt werden kann gilt es dieses entsprechend der DIN EN 12927-6 [No05] auszutauschen.

Vergleichsweise dazu werden keine Ablegekriterien laufender Faserseile in Normen und Richtlinien genannt. Die DIN EN ISO 9554 [No11] gibt an, dass jede Änderung eines Faserseiles bei Schleppseilanwendungen als Ablegekriterium zu verstehen ist, sobald das Seil nicht mehr in seiner Anwendung einsetzbar ist. Die VDI 2500 [VD90] kennzeichnet als Ablegekriterium für Faserseile den „Bruch von mehr als 10 % der Garne des Seilquerschnittes“. Oftmals ist diese jedoch wegen der Seillänge bzw. einer Kern-Mantel-Struktur nicht festzustellen. Aussagen über den Grad der Schädigung am Seil werden nicht definiert. Ausschließlich für ausgewählte Seilkonstruktionen basierend auf Versuchen kann die Lebensdauer von Faserseilen berechnet werden [Fe91].

In fördertechnischen Anwendungen unterliegen Faserseile im Laufe der Zeit beim Lauf über Scheiben bzw. Trommeln u. a. einer tribologischen Beanspruchung und daraus folgenden Alterungs-, Verschleiß-, Ermüdungs- und/oder Überlastungserscheinungen, vgl. Abbildung 2.

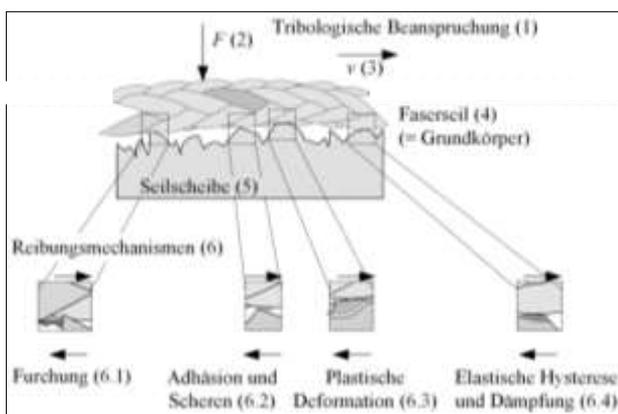


Abbildung 2. Tribologische Beanspruchung bei laufenden Faserseilen

Verschiedene Erscheinungsformen von Schäden eines laufenden Faserseils äußern sich u. a. im:

- Ermüden der Fasern, wie z. B. Fibrillieren der Fasern, Querrisse, ... ,

- Verformen, Verdrehen des Seils, wie z. B. Mantelverschiebung, ... ,
- Abspalten der Faserschichte,
- Brechen der Fasern, Litzen oder des Seils und
- Verändern der Flechtlänge FL.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

3.1 LÖSUNGSANSATZ

Als wichtigstes Ablegekriterium bei Stahldrahtseilen gilt die Anzahl von Drahtbrüchen auf bestimmten Bezugsängen. Dahingegen zeigen insbesondere Hochleistungsfaserstoffe infolge tribologischer Beanspruchung, wie es beim Lauf über Scheiben und Trommeln der Fall ist, einen abrasiven Verschleiß, der sich in Materialermüdung, Brechen der Fasern und Litzen, etc. und letztendlich teilweise im Seilbruch äußert.

In gewissen Grenzen lässt sich die Messmethodik der gebrochenen Drähte bei den Stahldrahtseilen auch auf Faserseile übertragen. Hierfür werden HM-HT-Faserseile an der TU Chemnitz u. a. mit elektrisch leitfähigen Elementen, wie z. B. isolierte (vgl. Abbildung 3) und unisolierte Kupferlitzen, elektrisch leitfähige Bikomponenten-Fasern (BiKo-Fasern, vgl. Abbildung 4) sowie mit Silber bedampften Polyamid-Garnen (Elitex®, vgl. Abbildung 5) ausgestattet.

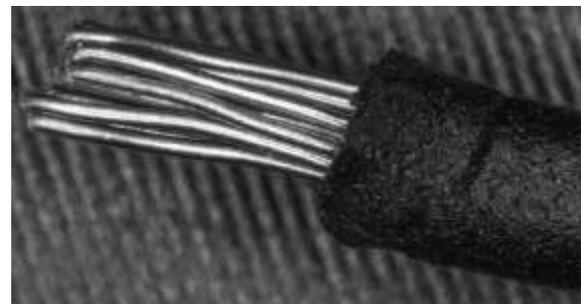


Abbildung 3. Isolierte Kupferlitze



Abbildung 4. Elektrisch leitfähige BiKo-Faser

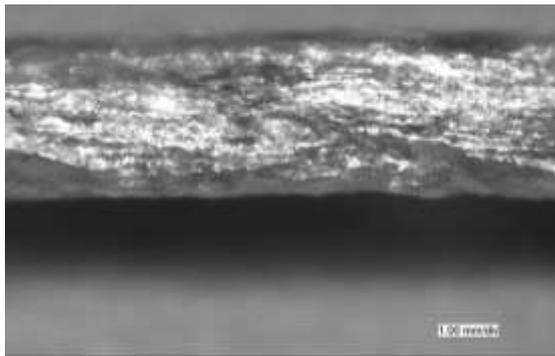


Abbildung 5. Elitex®-Garn

Nachfolgend wird insbesondere auf die Integration von unisolierten elektrisch leitfähigen Kupferdrähten eingegangen, da diese zu erfolgversprechenden Ergebnissen geführt haben, vgl. Abbildung 6.

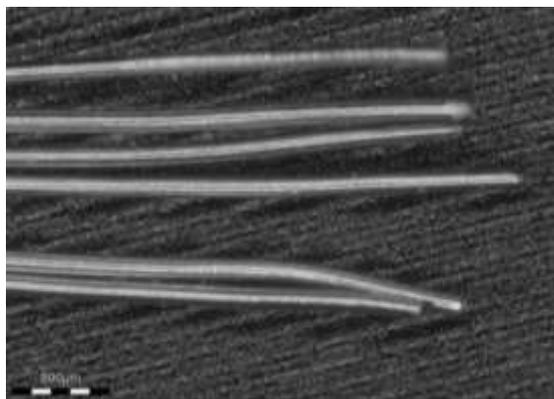


Abbildung 6. Unisolierte Kupferdrähte

Da Faserseile in fördertechnischen Anwendungen u. a. einer Biegebeanspruchung unterliegen, wird diese Beanspruchung eines Seiles mittels verschiedener Biegewechselversuche an TU Chemnitz simuliert. Während der Biegewechselbeanspruchung erfolgt die Messung des elektrischen Widerstandes der Kupferdrähte an den Seilenden. Ziel dieser Messmethode ist es, eine Veränderung des elektrischen Widerstandes der Seile mit steigender Biegewechselzahl N zu erfassen und als Ablegekriterium zu nutzen.

3.2 HERANGEHENSWEISE 5-Zonen-Biegewechselprüfung

An der Professur Förder- und Materialflusstechnik wurden anhand von Biegewechselversuchen lebensdauerbeeinflussende Größe laufender Faserseile untersucht und daraus entsprechende Seilkonstruktionen abgeleitet. Abbildung 8 zeigt den Versuchsaufbau des 5-Zonen-Biegewechselprüfstandes der TU Chemnitz mit elektrischer Widerstandsmessung.

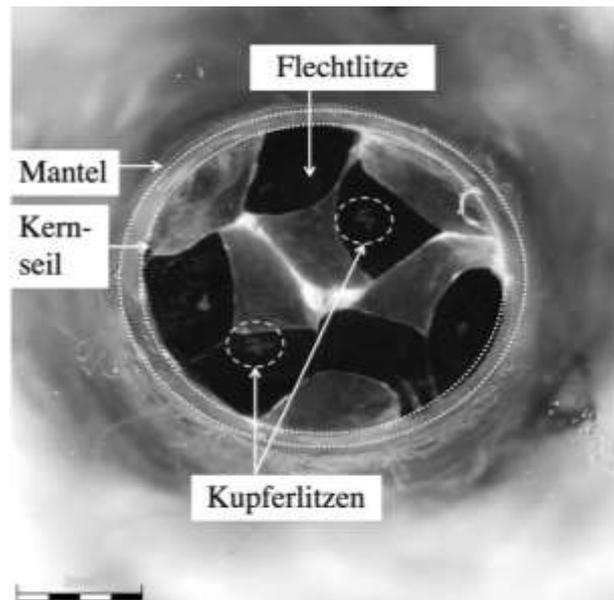


Abbildung 7. Seilquerschnitt mit Kupferlitzen

Ein 6-mm-Aramid-Seil (1) mit einer Bruchkraft von $F_B = 32$ kN (vgl. und Abbildung 7) wurde auf die fünf Prüfscheiben (2) des CBOS-Prüfstandes (engl. CBOS: cycle bending over sheave) aufgelegt und einer Biegewechsel-Beanspruchung bei einer Seilzugkraft von $S = 8$ kN, einem Biegedurchmesser-Verhältnis von $D/d = 25$ (D = Scheibendurchmesser; d = Seilnennendurchmesser) und einer Biegefrequenz von $f = 4,27$ Zyklen/min bis zum Seilbruch unterzogen. Als Versuchsseil diente eine Kern-Mantel-Konstruktion mit unisolierten Kupferlitzen in sechs der insgesamt zwölf Flechtlitzen des Aramid-Kernseils (Technora® T221, Feinheit $Tt = 176$ dtex) mit einer Flechtlänge von $FL = 39,0$ mm und einem 32-litzigen Polyester-Mantel. Dabei werden die Kupferlitzen an den Seilenden (3) an einen Datenlogger (5) kontaktiert. Dieser Datenlogger zeichnet den elektrischen Widerstand R über die gesamte Länge des Seiles auf. Anschließend werden den Biegewechselzahlen N die gemessene Widerstandswerte je Bezugslänge R in Ω/m zugeordnet.

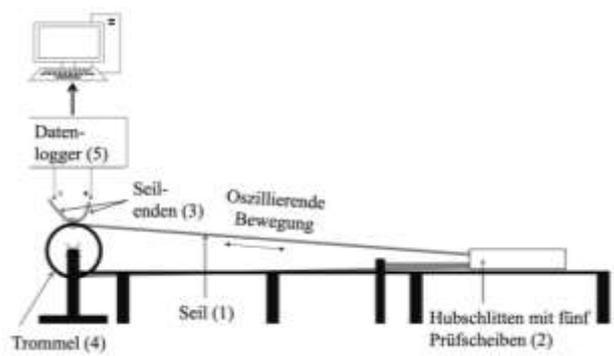


Abbildung 8. 5-Zonen-Biegewechselprüfstand

3.3 ERGEBNISSE

Es ließ sich feststellen, dass mit zunehmender Biegewechselzahl die Drähte im Seilinneren des HM-HT-Seils brechen, diese sich jedoch aufgrund der oszillierenden Bewegung über die Seilscheiben im Seilinneren stets neu kontaktieren, vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10.

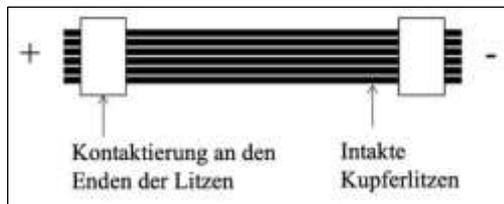


Abbildung 9. Kupferlitzen vor Prüfbeginn

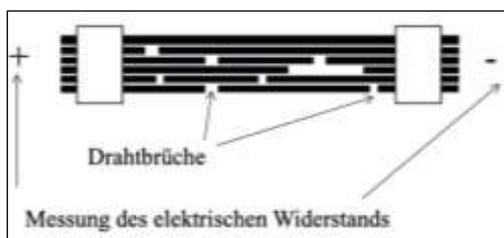


Abbildung 10. Kupferlitzen nach dem CBOS-Test

Die symmetrische Anordnung der Kupferlitzen sowie deren helixförmiger Verlauf im Geflecht bewirken das ausreichend viele Kontaktierungspunkte im Seil vorliegen. Weitere sowohl visuelle als auch messtechnische Erkenntnisse des Versuchsseils während der Biegewechselprüfung sind:

Verschleißerscheinungen bis 20 % der Seillebensdauer:

- es sind erste visuelle Verschleißerscheinungen zuerkennen, dies spiegelt sich in einer mindestens 3-fachen Erhöhung der Widerstandsänderung wieder,
- die Faserschicht ist an der wirkenden Seiloberfläche abgetragen und kann demzufolge nicht mehr als Schmiermittel wirken,
- abrasiver Verschleiß an den Faseroberflächen,
- Fibrillenreste im Seil wirken als Reibmittel und verschleifen somit auch vermehrt die Drähte → dies spiegelt sich in einer elektrischen Widerstandsänderung wieder

Verschleißerscheinungen bis 80 % der Seillebensdauer:

- gebrochene Fasern/Litzen bewirken die Zunahme eines voluminöseren Seildurchmessers → dies geht mit einer Erhöhung des Widerstandes um mindestens das Doppelte einher,
- bis 80 % der Lebensdauer unterliegen die Fasern einem zunehmenden Ermüdungsverhalten und brechen, mit jedem Litzenbruch erhöht sich der elektrische Widerstand

Abbildung 11 zeigt, dass die Widerstandsschwankungen bei ca. 20 % und 80 % der Lebensdauer in der oszillierenden Bewegung des Seiles über die Seilscheiben während des CBOS-Versuches begründet liegen. Dies kann als Ablegekriterium nutzbar gemacht werden.

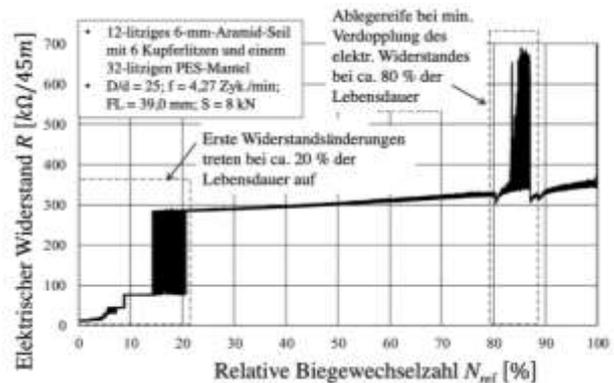


Abbildung 11. Widerstandsmessung während des CBOS-Tests

Es ist anzunehmen, dass gebrochene Drähte beim Ein- und Auslaufen im geraden Zustand des Biegewechsels (im Seilstrang) sich vermehrt untereinander kontaktieren. In diesen Momenten sind die geringeren Widerstände der Widerstandsschwankungen bei ca. 20 % und 80 % der Lebensdauer messbar.

Durch die fortwährende Neukontaktierung der Drähte untereinander ist es möglich, dass ein Durchgangswiderstand bis zum Seilbruch messbar ist, vgl. Abbildung 12. Infolge des zunehmenden Verschleißes und der wachsenden Anzahl an Drahtbrüchen im Seilinneren erhöht sich der elektrische Widerstand und ist als Ablegekriterium nutzbar.

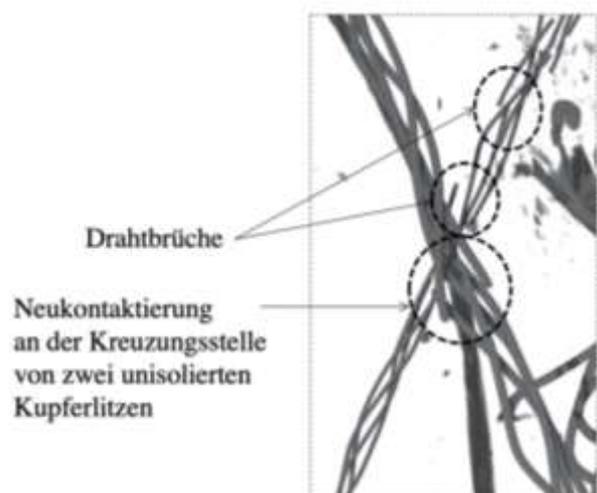


Abbildung 12. Ausschnitt eines CT-Scans der gebrochenen Kupferlitzen im Seillängsschnitt nach dem CBOS-Test

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Arbeiten an der TU Chemnitz konnten erste Ablegekriterien basierend auf spezifischen visuellen Verschleißerscheinungen der Faserstoffe und des veränderten elektrischen Widerstandes mit zunehmender Biegewechselzahl abgeleitet werden. Dennoch sind weitere Versuche und kombinierte Prüfmethoden unablässig, um die bisherigen Erkenntnisse bei ca. 20 % und 80 % der Biegewechsellebensdauer als Ablegekriterien als sicheres Kriterium zu nutzen.

Dipl.-Ing. Annett Schmieder, Research Assistant at the Technische Universität Chemnitz.
Address: Professur für Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Germany,
Phone: +49 371 531 33 89 2, Fax: +49 371 531 83 38 92,
E-Mail: Annett.Schmieder@mb.tu-chemnitz.de

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering at the Technische Universität Chemnitz.
Address: Professur für Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Germany,
Phone: +49 371 531 36 09 2, Fax: +49 371 531 83 60 92,
E-Mail: Markus.Golder@mb.tu-chemnitz.de

LITERATUR

- [He13] Heinze, T.: Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus hochfesten Faserseilen, Dissertation, TU Chemnitz, 2013
- [Mi11] Michael, M.: Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten synthetischen Faserseilen, Dissertation, TU Chemnitz, 2011
- [Be18] Berndt, D.: Inbetriebnahme eines Prüfstandes und Versuche zur Treibfähigkeit von HM-HT Faserseilen im Umgebungsklima eines Erzbergwerkes, Masterarbeit, TU Chemnitz, 2018
- [Pu11] Putzke, E.: Untersuchung von Polymermodifikationen für deren Einsatz in synthetischen Fasern, TU Chemnitz, 2011
- [Ma15] Mammitzsch, J.: Untersuchungen zum Einsatz von ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in Seilen für die Fördertechnik, TU Chemnitz, 2015
- [No05] Norm DIN EN 12927-6: Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr - Seile: Teil 6: Ablegekriterien, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005
- [VD90] VDI 2500: Faserseile: Beschreibung - Auswahl - Bemessung, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V., 1990
- [No11] Norm DIN EN ISO 9554: Faserseile – Allgemeine Festlegungen, ICS 59.080.50, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011
- [Fe91] Feyrer, K.; Vogel, W.: Hochfestes Faserseil beim Lauf über Seilrollen, 42. Aufl., 1991