

Einflussgrößen auf die Lebensdauer von HM-HT-Faserseilen

Influencing factors on the lifetime of HM-HT fibre ropes

Annett Schmieder
Andreas Felber
Markus Golder

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

Stahldrahtseile haben sich aufgrund ihrer hohen Bruchkraft und Betriebssicherheit sowie langjähriger Erfahrungen als Übertragungs-, Verbindungs- und Sicherheitselemente in intermittierenden Förderern, wie Kranen und Aufzügen etabliert. Sie weisen jedoch Nachteile, wie hohe Eigenmasse, geringe Biegeelastizität und Korrosionsempfindlichkeit auf. Steigende Anforderungen an ein energieeffizientes und ressourcenschonendes Betreiben von technischen Anlagen fordern zunehmend neue Materialien, Technologien und Verfahren. Demzufolge rücken auch textile Maschinenelemente in Form von HM-HT-Faserseilen (engl.: high modulus - high tenacity) in den Fokus der Betrachtungen. Sie bieten aufgrund ihres günstigen Bruchkraft-Masse-Verhältnisses eine Alternative zu den Stahldrahtseilen. Mit den wachsenden Innovationen gehen jedoch auch neue Schadensfälle einher, da es an Erfahrungswerten und Langzeitstudien textiler Zug- und Tragmittel fehlt.

[Schlüsselwörter: HM-HT-Faserseile, Schadensanalyse, Ablegereife, abrasiver Verschleiß, CBOS-Test]

Steel wire ropes have established as transmission, connection and safety elements in intermittent conveyors such as cranes and elevators. This is justified due to their high breaking strength and operational reliability as well as their many years of experience. However, steel wire ropes have disadvantages such as high net mass, low bending elasticity and corrosion sensitivity. Increasing demands on energy-efficient and resource-efficient operation of technical systems are increasingly require new materials, technologies and processes. As a result, textile machine elements like HM-HT fibre ropes (high modulus - high tenacity) are also being considered. They offer an alternative to steel wire ropes due to their favorable breaking force-mass ratio. However, with the growing innovations new cases of damage also go hand in hand. It lacks on experience and long-term studies of textile tensile elements.

[Keywords: HM-HT fibre ropes, damage analysis, discard, abrasive wear, CBOS test]

1 EINLEITUNG

Derzeit werden vorrangig Stahldrahtseile für Unstetigförderer eingesetzt, Abbildung 1.

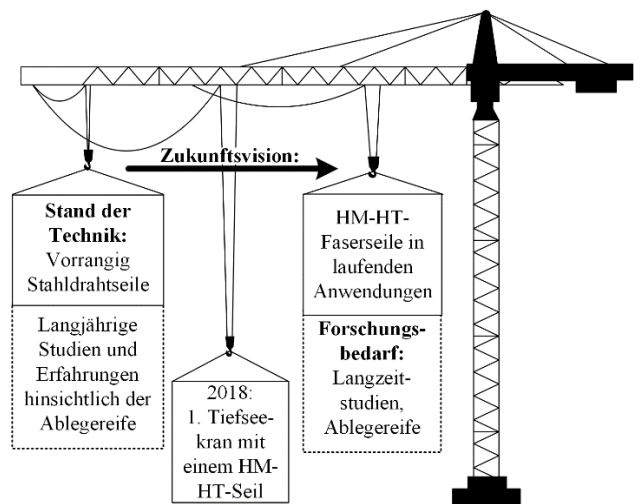


Abbildung 1. Stand der Technik

Aufgrund wachsender Anforderungen, u. a. an Förderlängen und Förderkapazitäten, stoßen Stahldrahtseile jedoch zunehmend an ihre technischen Grenzen. Dies betrifft insbesondere die hohen Eigenmassen, die hohe Biegesteifigkeit und die Korrosionsempfindlichkeit der Seile. Aus diesen Gründen heraus gilt es nach Alternativen wie den HM-HT-Faserseilen zu suchen [He13, Mi11, Be18, Pu11, Ma15].

Das hohe Potenzial des Einsatzes von textilen Zug- und Tragmitteln ist u. a. in intermittierenden Förderern wie Tiefseekranen zu sehen. Tiefseekrane, wie der RL-K 7500 der Fa. Liebherr, erreichen mit einem Stahldrahtseil mit einem Durchmesser von 82 mm eine Fördertiefe von 3.600 m und eine Nutzlast von bis zu 300 t [Li11]. 2018 wurde durch die Firma MacGregor erstmalig ein Tiefseekran, der FibreTrac-Kran, mit einem HM-HT-Faserseil ausgestattet. Der Hersteller gibt an, dass es möglich ist einen Kran mit

einem Stahldrahtseil, der für Nutzlasten von 250 t und Fördertiefen bis 3.000 m dimensioniert wurde, durch den FibreTrac-Kran zu ersetzen. Das Faserseil dieses Kranes hat einem Durchmesser von 88 mm und kann eine Tragfähigkeit von 150 t und Fördertiefen bis zu 4.000 m erzielen [Ma].

Der Stand von Forschung und Technik zeigt, dass HM-HT-Faserseile so hergestellt werden können, dass sie gegenüber Stahldrahtseilen eine gleiche oder höhere Zugfestigkeit besitzen, aber lediglich 20 % bis 25 % der Eigenmasse eines Stahldrahtseiles aufweisen. Des Weiteren verfügen hochmodulige und hochfeste Faserseile im Vergleich zu Stahldrahtseilen bei vergleichbarer Bruchkraft folgende Vorteile in laufenden Anwendungen [He13, Mi11, Be18, Pu11, Ma15]:

- Erhöhung der Fördermassen und -längen,
- Reduzierung der erforderlichen Antriebsleistung,
- Reduzierung der Biegesteifigkeit,
- gute Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit,
- gutes Handling beim Austausch des Tragmittels und
- gute Dämpfungseigenschaften.

2 PROBLEMSTELLUNG

Faserseile unterliegen in fördertechnischen Anwendungen beim Lauf über Scheiben und/oder Trommeln u. a. einer fortschreitenden Schädigung. Diese wird durch die Relativbewegung der Litzen untereinander und im Zusammenspiel mit Umgebungsbedingungen verursacht und geht mit Alterungs-, Verschleiß- und Überlastungserscheinungen einher. Tritt ein Zustand des Seiles ein, indem keine sichere Verwendung mehr gewährleistet werden kann, wird von Ablegereife gesprochen und es gilt dieses Tragmittel abzulegen.

Derzeit sind Ablegkriterien für Stahldrahtseile in den Normen VDI 2358 [VD12], DIN EN 13001 [No15] und DIN EN 12927-6 [No05] und für Faserseile in die Normen VDI 2500 [VD90] und DIN EN ISO 9554 [No11] festgelegt. Jedoch sind die meisten dieser Kriterien für Faserseile nicht in die Praxis übertragbar und eine zuverlässige Ermittlung der Einsatzgrenze nicht umsetzbar. Es werden keine Aussagen über den Grad der Schädigung am Seil getroffen. Die Lebensdauer von Faserseilen kann bisher nur für ausgewählte Sonderfälle basierend auf Versuchen u. a. durch Vogel und Feyrer, berechnet werden [Fe91].

3 DAS FÜNF-KATEGORIEN-SCHEMA

Abbildung 2 zeigt im Überblick das entwickelte „Fünf-Kategorien-Schema“ der Einflussfaktoren auf die

Seillebensdauer. Alle Einflussgrößen stehen in direkten Zusammenhang und beeinflussen sich untereinander [He13, Mi11, Be18, Pu11, Ma15].

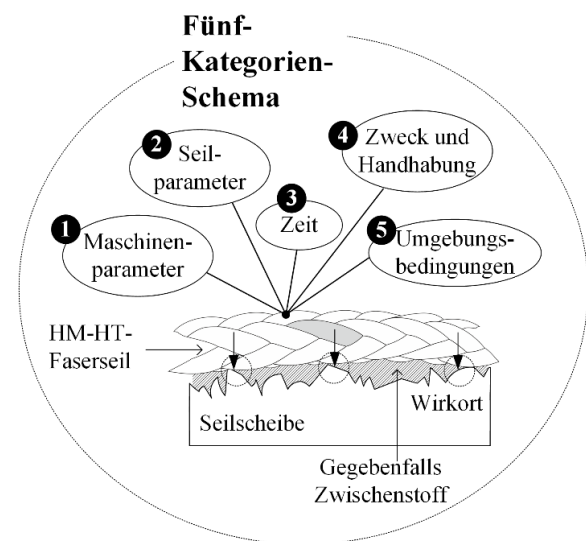


Abbildung 2. Das Fünf-Kategorien-Schema

Der Zweck von Seilen, die als Zug- und Tragmittel in der Fördertechnik Anwendung finden beinhaltet Funktionen, wie das Heben, Tragen, Ziehen, Halten, Abspannen, Sichern und Fördern von großen Nutzlasten über längere Förderstrecken.

Umgebungsbedingungen werden durch mechanische, biologische, chemische, thermische und tribologische Beanspruchungen sowie durch klimatische Einflüsse gekennzeichnet. Die tribologische Beanspruchung wird durch die Tribosysteme Faser-Faser und Seil-Seilscheibe charakterisiert. Dabei führt die Relativbewegung der Fasern untereinander zu einem fortwährenden Verschleiß des Faserstoffes/der Beschichtung. Des Weiteren wirken insbesondere bei Außenanwendungen klimatische Einflüsse, wie UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Luftverunreinigungen (z. B. Staub, Rauch, Abgase, etc.), die die Lebensdauer von Faserseilen beeinträchtigen können.

Der Faktor Zeit betrifft die Einwirkdauer (kurz-, langzeitig) und den zeitlichen Verlauf der Beanspruchung, z. B. ruhend, monoton an-/absteigend, schwingend (zyklisch) oder stoß-/schlagartig auf das Seil.

Zu den Seilparametern gehören der Faserstoff, die Beschichtung/Schlichte, die Seilmachart, der Seilnennendurchmesser, der Reibkoeffizient und die Seilendverbindung.

Die Maschinenparameter der Fördermaschinen werden u. a. durch die Beschleunigung bzw. Verzögerung, die Geschwindigkeit, die Rillengeometrie, den Scheibendurchmesser, die Biegerichtung, die Seilzugkraft, die Biege-länge, die Anzahl der Scheiben, etc. beschrieben [He13, V90, Nov17, We17].

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

4.1 ALTERUNGERSCHEINUNGEN

Im Bereich von Förderanlagen, wie sie beispielsweise in Kalibergwerken oder bei Kranen zum Einsatz kommen, bieten HM-HT-Faserseile ein hohes Potential zur Steigerung der Förderlängen und -kapazitäten. Dabei können diese textilen Tragmittel beispielsweise einer laugen- bzw. suspensionshaltigen oder verschmutzten Umgebung und/oder einer Bewitterung durch UV-Strahlung ausgesetzt sein. Aus diesem Grund heraus wurde der Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die Lebensdauer von Faserseilen untersucht. In einer Langzeitstudie wurden die Alterungserscheinungen u. a. an 6-mm-UHMW-PE-Seilen analysiert. Diese UHMW-PE-Seile wurden u. a. in einer Suspension wie sie in Bergwerken vorkommen kann für drei, sechs und zwölf Monate eingelagert. Nach der Entnahme wurden Anlagerungen von Salzkristallen und Fremdkörpern mit einer Größe von $l = 15 - 300 \mu\text{m}$ und Fibrillierungen der Fasern festgestellt. Exemplarisch zeigt Abbildung 3 ein Seil bei dem sich Salzkristalle nach der Entnahme und der Trocknung insbesondere an den Kreuzungspunkten der Flechtlitzen ausgebildet haben. Dies liegt darin begründet, dass der Transport von Fremdkörpern, Salzkristallen, Quarzen etc. vermehrt an den Kreuzungsstellen gehindert wird.

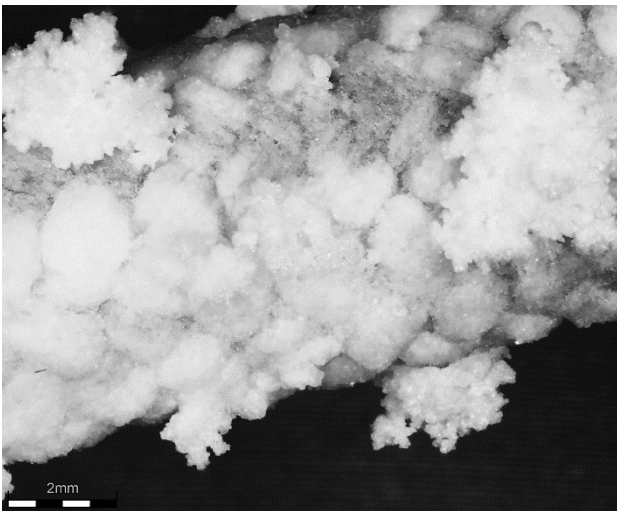


Abbildung 3. Anlagerungen von Salzkristallen

Abbildung 4 zeigt wie sich Fremdkörper im Seilinneren an einzelnen Fasern angelagert haben. Infolge der chemischen und mechanischen Beanspruchung, die die Salzkristalle und Fremdkörper ausüben führt dies u. a. zu Kettenspaltungen der HM-HT-Fasern. Dabei lockern sich die schwach ausgebildeten lateralen Bindungen der HM-HT-Fasern langfristig, führen u. a. zu Fibrillen und somit zur Reduzierung der Faserquerschnitte. Diese Alterungserscheinungen spiegeln sich im Verlust der Bruchkräfte der Seile mit zunehmender Zeit wieder.

Weitere Untersuchungen zu Umwelteinflüssen erfolgten im Rahmen des BMBF geförderten Projektes „TeD – Textile Deichsicherung“.



Abbildung 4. Fremdkörper an den UHMW-PE Fasern

4.2 VERSCHLEIBERSCHEINUNGEN

Einfach-Biegewechselprüfung

Seile im Maschinenbau werden entsprechend der VDI 2358 [VD12] nach ihrem Verwendungszweck in laufende, stehende, Trag- und Anschlagseile unterschieden. Die VDI 2358 [VD12] beschreibt laufende Seile als „Seile, die über Treibscheiben, Seilscheiben und Trommeln laufen und dabei deren Krümmungen annehmen, z. B. Hubseile, Einzelseile, Fahrseile von Kranen, Aufzugseile, Schrapperseile und Zugseile von Seilbahnen“. Die Krümmung der Seile über die Seilscheiben wird als Biegewechsel definiert. Ein Biegewechsel über eine Scheibe wird nach VDI 2358 [VD12] wie folgt charakterisiert:

- gebogen – gerade – gebogen oder
- gerade – gebogen – gerade und
- gebogen – gerade – entgegengesetzt gebogen (Gegenbiegung).

Die Lebensdauer der Seile im Gebrauch wird entsprechend der Einflussfaktoren des Fünf-Kategorien-Schemas bestimmt. Mithilfe einer CBOS-Maschine (cycle bending over sheave) kann die Biegewechselzahl ermittelt und das Alterungs- und Verschleißverhalten der Seile analysiert werden. Abbildung 5 zeigt den Aufbau einer Einfach-CBOS-Maschine. Dabei wird das Seil (4) mit einer Endverbindung (5) versehen und über die Antriebs- (6) und Seilscheibe (2) gelegt. Durch die Hin- und Herbewegung (7) über eine einzelne Seilscheibe (2) wird das Seil unter konstanter Seilzugkraft S (1) gebogen. Die Prüfung erfolgt bis zu einem Zeitpunkt x oder bis einzelne Litzen bzw. das ganze Seil (4) versagen. Der Seilabschnitt, der über die Prüfscheibe (3) läuft wird Biegelänge l_B (3) bezeichnet. Die Seilzugkraft S und das Scheibendurchmesser-Seilnenn-durchmesser-Verhältnis D/d sind im CBOS-Test maßgebende Lebensdauer-Einflussfaktoren.

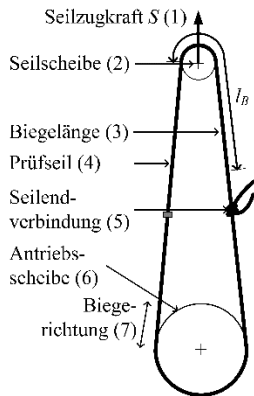


Abbildung 5. Einfach-Biegewechselprüfstand

Ziel von Forschung und Industrie ist es, Ablegekriterien für Faserseile zu definieren. Aus diesem Grund heraus wurden in einem Versuch die visuellen Verschleißerscheinungen von Faserseilen untersucht und bewertet. Hochfeste Faserseile unterliegen infolge von Biegewechselbeanspruchung u. a. einen abrasiven Verschleiß sowie einem Ermüdungsverhalten des Faserstoffes. Dabei verschleiben bzw. altern hochfeste Faserstoffe auf unterschiedliche Art und Weise. Dies führt bei Seilen aus Faserstoffmischungen teilweise zu zeitlich versetzten visuellen Merkmalen des Seiles, wie z. B. Fibrillierungen, Faser- und Litzenbrüche, Querrisse, viskoplastische Verformungen und Veränderung des Farb-/Glanzeffektes des Faserstoffes. Die Faserquerrisse sowie die Fibrillen werden aufgrund des eintreffenden Lichtes an den Faseroberflächen unterschiedlich reflektiert. Mithilfe eines Farbsensors können diese verschleißbedingten Veränderungen der Farben in Form von Farbmaßzahlen an Seilen erfasst und bewertet werden [No17, Ri11, Sch, Le]. In einem Versuch wurden hierfür 6-mm-Doppelgeflecht-Seile mit einem Mantel aus weißem UHMW-PE (ultra-high-molecular-weight Polyethylene) und schwarzem LLCP (lyotropic liquid crystal polymer) verwendet. Abbildung 6 zeigt das Referenzseil.

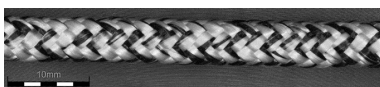


Abbildung 6. Referenzseil

Mit zunehmender Biegewechselzahl bilden die UHMW-PE-Fasern aufgrund eines viskoplastischen Verformungsverhaltens unter Biegewechselbeanspruchung Schlingen am Seilmantel aus. Dadurch wirkt das Seil optisch heller, vgl. Abbildung 7.

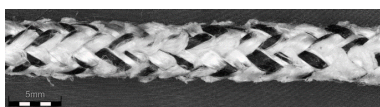


Abbildung 7. Verschleiß der weißen UHMW-PE-Fasern

Die schwarzen LLCP-Fasern verschleiben unter Biegewechselbeanspruchung abrasiv und brechen in den

Kreuzungsstellen der Litzen mit zunehmender Biegewechselzahl, vgl. Abbildung 8. Infolgedessen ragen die schwarzen LLCP-Fasern aus dem Seilmantel heraus und das Seil wirkt optisch dunkler.



Abbildung 8. Verschleiß der LLCP-Fasern

Vor der eigentlichen CBOS-Prüfung wurden dem Farbsensor die drei Seilzustände aus Abbildung 6 bis 8 angelernt. Der Sensor arbeitet nach dem Dreibereichsverfahren und hat entsprechend der Farbmeterik den drei Seilzuständen Farbmaßzahlen zugeordnet. Anschließend wurde in einem Einfach-CBOS-Test die Lauffläche des Seiles in der Biegezone mithilfe des Farbsensors überwacht. Für jede Übereinstimmung zwischen einer der drei angelernten Farbmaßzahlen zu der Farbmaßzahl der aktuellen Lauf-läufe setzte der Farbsensor ein Ausgangssignal.

Abbildung 9 zeigt einen signifikanten Wechsel der Übereinstimmungen der angelernten Farbmaßzahlen bei ca. 80 % der relativen Biegewechselzahl. Dies kann als Ablegekriterium für dieses Seil definiert werden. Bei ca. 80 % der relativen Biegewechselzahl spiegelt sich der Verschleiß der LLCP-Garne in den Mantellitzen wieder. Dabei brechen die schwarzen LLCP-Garne und ragen aus dem Seilverbund heraus. Das Seil wirkt optisch dunkler. Der Farbsensor erkennt diesen angelernten Seilzustand und setzt Ausgangssignale für diese Farbmaßzahl.

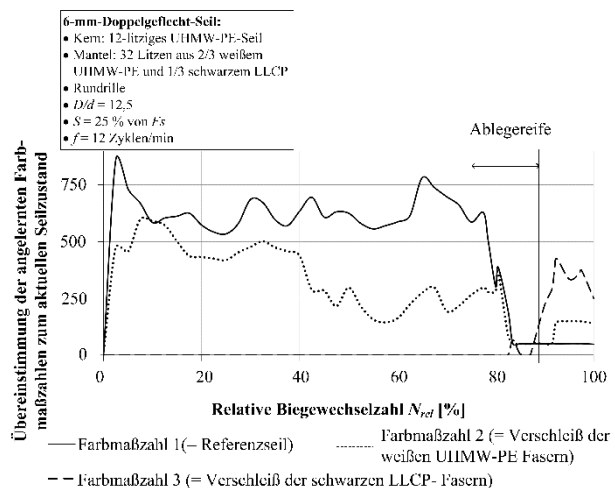


Abbildung 9. Ablegereifeerkennung mittels Farbsensor

5-Zonen-Biegewechselprüfung

An einem 5-Zonen-Biegewechselprüfstand wurde das Verschleißverhalten von HM-HT-Faserseilen untersucht und bewertet, vgl. Abbildung 10. Dabei können mithilfe

von fünf Seilscheiben unterschiedlich biegebeanspruchte Seilabschnitte an einem Prüfseil simuliert werden. Somit wird der Verschleißzustand in Abhängigkeit von der Biegewechsellebensdauer eines Seiles definiert. Der CBOS-Prüfstand unterscheidet in die Biegezone 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 % der nominellen Anzahl der Biegezyklen. Ein Seilabschnitt der beispielsweise über vier der fünf Prüfscheiben läuft wird als 80 %-Zone gekennzeichnet.

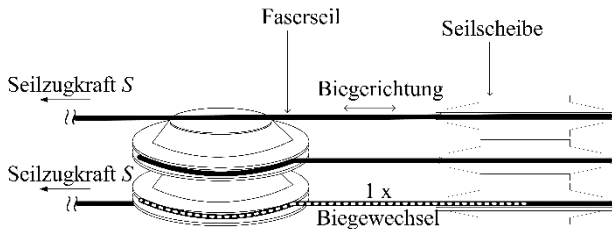


Abbildung 10. 5-Zonen-Biegewechselsprüfstand

Abbildung 11 bis 16 zeigen exemplarisch die unterschiedlichen Verschleißzustände eines 12-litzigen 6-mm-Faserseiles aus UHMW-PE mit einer Polyurethan-Beschichtung nach dem CBOS-Test. Als Seilzugkraft wurde $S = 25\%$ der Seilbruchkraft bei einem Scheibendurchmesser-Seildurchmesser-Verhältnis von $D/d = 25$ und einer Biegefrequenz von $f = 4,27$ Zyklen/min verwendet.

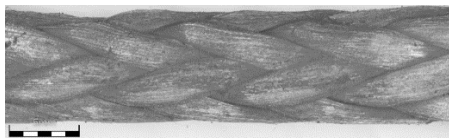


Abbildung 11. 0 % Lebensdauer des UHMW-PE-Seiles

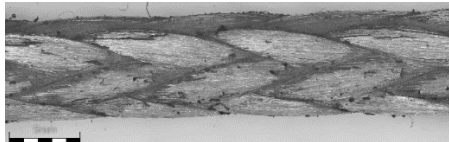


Abbildung 12. 20 % Lebensdauer des UHMW-PE-Seiles

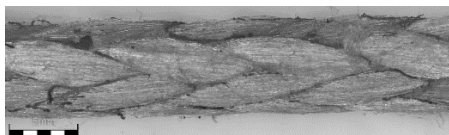


Abbildung 13. 40 % Lebensdauer des UHMW-PE-Seiles

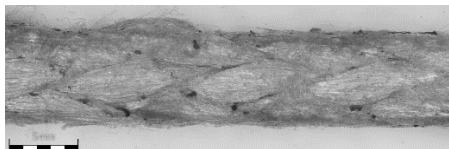


Abbildung 14. 60 % Lebensdauer des UHMW-PE-Seiles

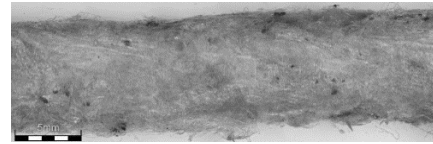


Abbildung 15. 80 % Lebensdauer des UHMW-PE-Seiles

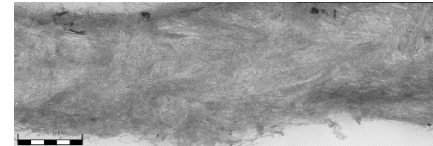


Abbildung 16. 100 % Lebensdauer des UHMW-PE-Seiles

Infolge des abrasiven Verschleißes während der Biegewechsellebensdauer brechen einzelne Fasern und Litzen aus dem Seil und führen zum Seilbruch. Die visuellen Verschleißerscheinungen allein lassen sich jedoch noch nicht in Ablegekriterien für HM-HT-Faserseile überführen.

Um während der CBOS-Untersuchungen messbare Kennwerte zu erzeugen, die als Ablegekriterien genutzt werden können wurden die Faserseile u. a. mit elektrisch leitfähigen Bikomponenten-Monofilen (BiKo) ausgestattet. Durch die Kontaktierung an den Seilenden ist eine elektrische Widerstandsmessung während des Biegewechselsversuches möglich. Durch die Veränderung des Widerstandes mit zunehmender Biegewechsellebensdauer können Rückschlüsse auf die Seillebensdauer gezogen werden. Da der elektrische Übergangswiderstand der BiKo-Monofile an den Kontaktierungsstellen undefinierbar ist wurde ein Zwischenwiderstand mit $R = 268 \text{ k}\Omega$ eingebaut. Abbildung 17 zeigt, dass durch die Veränderung des elektrischen Widerstandes auf den Wert $R = 268 \text{ k}\Omega$ während des CBOS-Testes das Ablegekriterium der Seile zwischen 75 – 85 % der Seillebensdauer liegt.

- 6-mm-Doppelgeflecht-Seil:**
- Kern: 12-litziges LLCPC-Seil
 - Mantel: 32-litziges PES-Seil
 - 5 Seilscheiben mit Rundrille
 - $D/d = 25$
 - $S = 25\%$ von F_S
 - $f = 4,27$ Zyklen/min

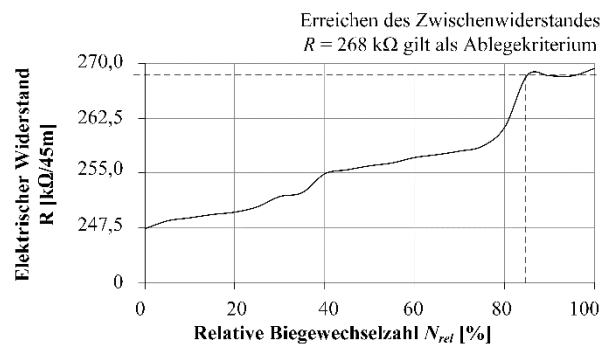


Abbildung 17. Messung des elektrischen Widerstandes während des 5-Zonen-CBOS-Testes

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Lebensdauer beeinflussende Faktoren von HM-HT-Seilen untersucht und bewertet. Es hat sich gezeigt, dass alle auf Biegung untersuchten HM-HT-Seile erste erkennbare Verschleißerscheinungen nach 10 bis 20 % der Lebensdauer besitzen. Dies ist dem Abtrag der Faserschlichte und dem darauffolgenden abrasiven Verschleißverhalten der HM-HT-Fasern geschuldet. Bei ca. 80 % der Seillebensdauer traten weitere markante Verschleißerscheinungen, wie Litzenbrüche und die Zunahme eines voluminöseren Seildurchmessers (Anmerkung: Messung erfolgte im entlasteten Zustand des Seiles) auf.

Ziel war es gewesen mithilfe des Fünf-Kategorien-Schemas in laufenden Anwendungen die Ablegereife von Faserseilen zu ermitteln. Dabei ließen sich messbare Ablegekriterien sowohl bei Untersuchungen mittels eines Farbsensors als auch bei der Messung des elektrischen Widerstandes während des CBOS-Testes bei ca. 80 % der Seillebensdauer definieren. Somit besteht, gestützt durch statistisch abgesicherte Versuchsreihen eine vorläufige Kombination der Ablegekriterien:

- Widerstandsmessung,
- Ermittlung der Farbmaßzahlen,
- Biegewechsel selbst und statistische Absicherung und
- optische Schäden am Seil.

LITERATUR

[He13] Heinze, T.: Zug- und biegewechselbeanspruchte Seil-geflechte 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 Förder-technik, TU Chemnitz, 2015

[Li11] Liebherr Components Biberach GmbH: Seiltrommel und Seilrolle für Faserseiltriebe, 2011

[Ma] MacGregor: Fibre-rope crane construction enters final stages, www.macgregor.com

[VD12] VDI 2358: Drahtseile für Fördermittel, ICS 53.020.30, Düsseldorf, 2012

[No15] Norm DIN EN 13001: Krane – Konstruktion allgemein, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 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

[Nov17] Novak, G.: Zur Abschätzung der Lebensdauer von laufenden hochmodularen Faserseilen, Dissertation, IFT Stuttgart, 2017

[We17] Wehr, M.: Beitrag zur Untersuchung von hochfesten synthetischen Faserseilen unter hochdynamischer Beanspruchung, Dissertation, IFT Stuttgart, 2017

[No17] Norm DIN 5033: Farbmessung: Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017

[Ri11] Richter, M.: Einführung in die Farbmessung, Sammlung Göschen, Berlin: De Gruyter, 2011

[Sch] Scharfsinn & Weitblick - KennerBlick: Farbmessung, www.kennerblick.net/farbmessung

[Le] Lexikon der Optik: Farbmessung, www.spektrum.de/lexikon/optik/farbmessung

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

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Felber, 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: Andreas.Felber@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