

Entwicklung einer multifaktoriellen Messmethode zur Zustandsüberwachung von Faserseilen für Krane – Belastungen im Seil und Wahl des Leitermaterials

Development of a Multifactorial Method for Condition Monitoring of Fiber Ropes for Cranes – Loads inside the Rope and Selection of the Conductor Material

Marco Ferrari
Georg Kartnig

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Technische Universität Wien

Zur Bestimmung des Seilzustandes und der Ablegereife von auf Kranen verwendeten Faserseilen wird ein Messsystem entwickelt. Dieses besteht aus zwei im Seilkern integrierten elektrischen Leitern und damit verbundenen elektronischen Komponenten in regelmäßigen Abständen. Diese Elektronik muss vor den mechanischen Belastungen im Seil geschützt werden. Zur Dimensionierung der dafür nötigen hohlzylinderförmigen Schutzhülle werden die darauf wirkenden Druckkräfte und deren Verteilung ermittelt. Weiters werden verschiedene Materialien auf deren Eignung als elektrische Leiter im Seil geprüft, die hauptsächlich von deren elastischen Dehnungsverhalten und elektrischen Widerstand abhängt.

[Schlüsselwörter: Faserseil, Zustandsüberwachung, Druckbelastung, elektrische Leiter]

A measuring system to determine the rope condition and time of discard of fiber ropes used on cranes is being developed. It consists of two electrical conductors integrated in the rope core and electronic components connected to them at regular intervals. These electronics have to be protected from the mechanical loads inside the rope. To design the necessary cylindrical and hollow protective covers, the compressive forces and their distribution are determined. Furthermore, various materials are tested for their suitability as electrical conductors in the rope, which mainly depends on their elastic elongation behavior and electrical resistance.

[Keywords: fiber rope, condition monitoring, pressure load, electrical conductors]

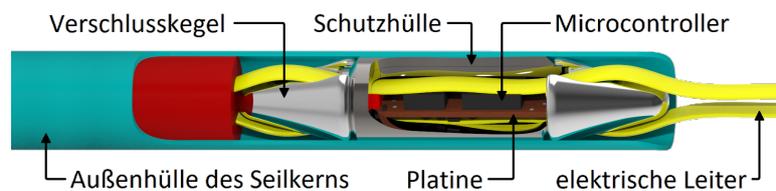
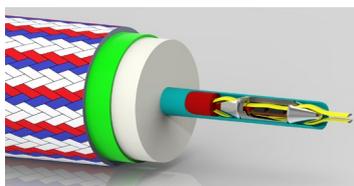


Abbildung 1. Seil mit integriertem Messsystem; Detailansicht der elektrischen Leiter mit Elektronik in Schutzhülle im Seilkern [1]

1 EINLEITUNG

Hochfeste Faserseile haben verschiedene Merkmale, welche die Verwendung auf Kranen begünstigen. Einige dieser Seileigenschaften ändern sich mit der Einsatzdauer und können daher für die Erkennung der Ablegereife genutzt werden. Durch die Bewertung mehrerer Eigenschaften auf deren Eignung zur Erkennung der Ablegereife wurde ein Messsystem entworfen, das für kurze Seilabschnitte die lokale Dehnung misst sowie die Temperatur im gesamten Seil überwacht. Dieses zu entwickelnde und zu erprobende Messsystem besitzt zwei elektrische Leiter im Seil, die in regelmäßigen Abständen durch Messknoten elektronisch verbunden sind. Diese Elektronik im Seil wird durch eine zylinderförmige Schutzhülle gegen äußere Einflüsse und Belastungen durch das Seil geschützt.

Diese Schutzhülle und die elektrischen Leiter (Abbildung 1) werden in Folge genauer betrachtet.

1.1 BELASTUNGEN AUF SCHUTZHÜLLE

Damit die Schutzhülle, insbesondere deren Wandstärke, mechanisch ausgelegt werden kann, müssen die darauf wirkenden Belastungen abgeschätzt oder gemessen werden. Die Schutzhülle ist ein Hohlzylinder aus Metall oder einem Faserverbundwerkstoff. Für die Messelektronik muss ein Innendurchmesser von 2,25 mm vorhanden sein, der Außendurchmesser soll möglichst gering sein, jedenfalls unter etwa 8 mm. Die zu bestimmende Belastung und Belastungsverteilung bietet die Grundlage für die Materialwahl und Ermittlung der Mindestwandstärke.

Es wird der Seileinsatz mit Einfachwicklung auf der Seilwinde vorausgesetzt. Daher sind die beiden Fälle gerades Seil und gebogenes Seil auf Seilscheibe zu untersuchen. Bei Mehrfachwicklung wäre im Bereich der Winde mit höheren Druckbelastungen am Seilkern zu rechnen.

1.2 ELEKTRISCHE LEITER

Die elektrischen Leiter im Seil übernehmen die Energieversorgung und Kommunikation mit allen Messknoten im gesamten Seil und dienen zusätzlich als Messleitungen für Widerstands- und Laufzeitmessungen. Zur Erfüllung dieser Funktionen sind einige Merkmale des Leitermaterials besonders gefordert:

- Verträglichkeit mit den anderen Seilwerkstoffen
- Elastische, reversible Dehnung entspricht oder übertrifft das Dehnungsverhalten des Faserseils
- Elektrische Leitfähigkeit möglichst hoch

Diese Eigenschaften werden von verschiedenen aussichtsreichen Materialproben in Zugversuchen ermittelt.

1.3 FORSCHUNGSFRAGEN

- Welche mechanischen Belastungen sind für die Auslegung der zylinderförmigen Schutzhülle um die Messelektronik zu erwarten?
- Welche Materialien kommen für die elektrischen Leiter infrage, insbesondere in Hinsicht auf elektrische Leitfähigkeit und elastische Dehnbarkeit?

2 BESTIMMUNG DES DRUCKS AUF SCHUTZHÜLLE

Hohlzylinder wie die Schutzhülle können besonders große Druckkräfte von innen ertragen (Abbildung 2 a). Diese bewirken gleichmäßige Zugspannungen im Mantel. Gleichmäßig verteilter, von außen wirkender Druck am gesamten Umfang führt zu gleichmäßigen Druckspannungen im Mantel (Abbildung 2 b). Hier besteht im Gegensatz zum Druck von innen die Gefahr des Beulens. Bei einer ungleichmäßigen Druckverteilung treten im Mantel zusätzliche Biegespannungen auf (Abbildung 2 c). Der ertragbare Außendruck wird verringert. Es ist daher bei den folgenden Untersuchungen nicht nur die maximale Flächenpressung auf den Körper im Seilkern relevant, sondern auch die Verteilung des Drucks am Umfang dieses Kernkörpers.

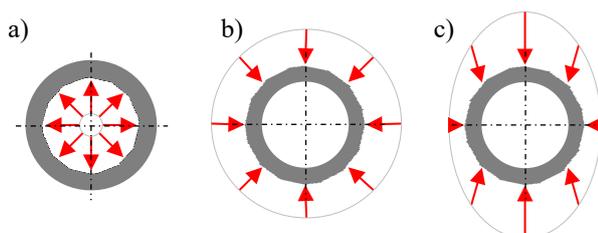


Abbildung 2. Druckverteilungen auf Hohlzylinder

Die im folgenden betrachteten Methoden zur Ermittlung dieser Belastungen im Seil sind:

- Vereinfachte analytische Betrachtung
- Messtechnische Erfassung mit Druckmessfolien

Analysiert wurden dabei jeweils die Fälle:

- gerades Seil unter reiner Zugbelastung
- gebogenes Seil auf Seilscheibe auf Zug belastet

2.1 ANALYTISCHE BETRACHTUNG

Mit einigen Annahmen kann die komplexe Seilstruktur so weit vereinfacht werden, dass eine analytische Betrachtung der Druckkräfte im Seilinneren möglich wird. Die Ergebnisse ermöglichen eine Abschätzung, wie sich eine Veränderung z.B. des Kernkörperdurchmessers oder der Schlaglänge auf die Belastungen im Seil auswirken.

p	Flächenpressung auf Messkörper im Seilkern
S	Seilzugkraft
S_i	anteilige Seilzugkraft eines Faserbündels
F_i	Zugkraft im Faserbündel
d_A	Außendurchmesser des Kernkörpers im Seilkern
d	Seildurchmesser
l	Schlaglänge der betrachteten Seillage
α	Steigung (0° entspricht parallelen Elementen)
r	Abstand zwischen Seilmitte und Faserbündel
R_0	Seilscheibenradius

2.1.1 GERADES SEILSTÜCK

Im ersten Schritt soll ein vereinfachtes, rein auf Zug beanspruchtes Faserseil untersucht werden. Das Seil wird durch Faserbündel beschrieben, die als spiralförmige Litzen ausgeführt sind oder aus parallelen Fasern bestehen können. Sie werden vereinfacht als homogenes Gefüge betrachtet. Die Faserbündel sind in mehreren Lagen mit der Steigung α und der Schlaglänge l in unterschiedlichen Radien r um den Seilkern gewickelt (Abbildung 3).

Abhängig von den geometrischen Bedingungen unterscheidet sich die gegenseitige Abstützung der Seilelemente (Abbildung 4). Im Gegensatz zu Stahldrähten ist dieser Effekt aufgrund der sehr geringen Quersteifigkeit der Faserbündel kaum vorhanden und es wird Fall (a) verwendet. Dieser ergibt die höchsten Druckbelastungen für den Kern.

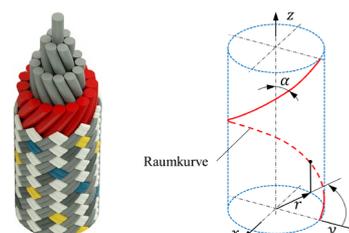


Abbildung 3. Spiralförmige Faserbündel im Seil und geometrische Beschreibung eines Faserbündels [2]

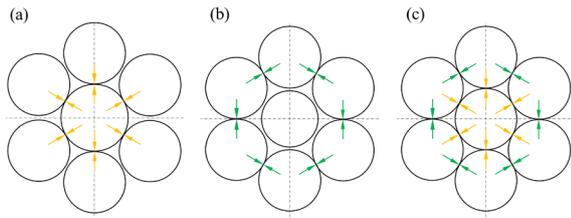


Abbildung 4. Anordnung in (a) gepackter Form, (b) drahtseilartige Konstruktion und (c) zusammengesetzte Form [3]

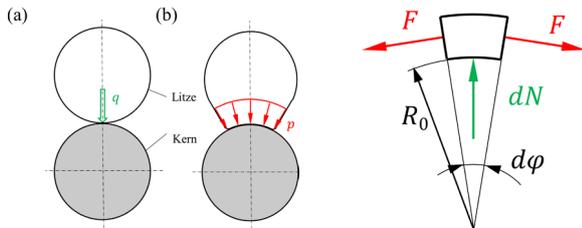


Abbildung 5. Anpassung der Faserbündelform an den Kern; gebogenes Faserbündelstück mit darauf wirkenden Kräften [4]

Aufgrund der geringen Quersteifigkeit herrscht zwischen Kernkörper und umgebenden Faserbündeln keine Punkt- bzw. Linienberührung. Stattdessen nimmt das Faserbündel die Form des vergleichsweise starren Körpers im Seilkern an (Abbildung 5 links). Die Druckverteilung am Kernkörper im Bereich eines Faserbündels wird als konstant betrachtet.

Die Berechnung der wirkenden Querkräfte in Abhängigkeit von der Seilzugkraft S und den geometrischen Bedingungen wird ausgehend vom Kräftegleichgewicht in Abbildung 5 rechts vorgenommen. Für die Litzenkraft im Faserbündel gilt $F_i = \frac{S_i}{\cos \alpha}$, die radiale Kraft dN folgt für kleine Winkel dφ als $dN = 2 \cdot F \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} \approx F \cdot d\varphi$.

Mit diesen Annahmen ergibt sich für das gerade Seil bei gleicher Schlaglänge aller Seillagen ein am Umfang konstanter Kontaktdruck p auf den Kernkörper, der linear von der Seilzugkraft S abhängt:

$$p = \frac{\pi \cdot S \cdot (d_A + d)}{d_A \cdot l^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot (d_A + d)^2}{4 \cdot l^2} + 1}} \quad (1)$$

2.1.2 GEKRÜMMTES SEILSTÜCK AUF SEILSCHEIBE

Während für das gerade Seil eine direkte Lösungsformel (1) gefunden werden konnte, ist das für das Seil auf der Seilscheibe nicht der Fall. Es gibt zwei Effekte, die die Berechnung erschweren:

- Einfluss der Seilrolle, deren Kontaktkräfte auf das Seil auch auf die Druckverhältnisse im Seilkern Einfluss haben
- komplexere Raumkurve der Faserbündel, die dadurch eine ungleichmäßige Druckverteilung am Kernkörperumfang erzeugen

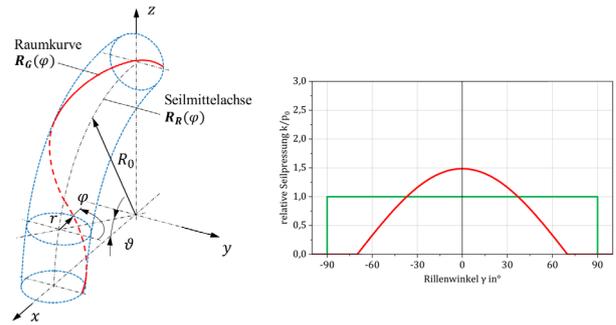


Abbildung 6. Raumkurve eines Faserbündels im gekrümmten Seil; kosinusförmige relative Druckverteilung zwischen Seil und Seilrille (Rillenkante 70°) nach Donandt [5]

Für die zwischen Seilscheibe und Seil wirkende Flächenpressung wird eine kosinusförmige Druckverteilung über die Auflagebreite mit Rillenkante 70° angenommen [5]. Diese übersteigt in der Rillennitte den gemittelten Druck um etwa 50% und nimmt zum Rand hin stark ab, siehe Abbildung 6. Die mit diesen Annahmen ermittelte Druckverteilung am Kernkörper, zusammengesetzt aus Druck durch Faserbündel (von Biegerseite außen höher) und Druck durch die Seilscheibe (von Biegerseite innen), ist in Abbildung 12 b dargestellt. Der minimale Druck knapp neben der Berührfläche mit der Seilscheibe entspricht dabei ungefähr dem Druck im gerade gespannten Seil, die Maximalwerte treten in Biegerichtung außen und innen auf. Durch diese gegenüberliegenden Druckmaxima ergeben sich im Hohlkörper Biegespannungen, die dessen Zusammendrücken und Versagen stark begünstigen. Für die Auslegung der Schutzhülle stellt das gebogene Seil im Vergleich zum geraden Seil daher den kritischeren Fall dar.

2.2 MESSTECHNISCHE ERFASSUNG

Durch die Messung der Druckkräfte in einem realen Seil konnten aussagekräftige Ergebnisse gewonnen werden. Auf einer Biegewechselprüfmaschine wurden mit Druckmessfolien versehenen Prüfkörper in ein geflochtenes Faserseil eingebracht und durch verschiedenen Seilzugkräften je zwei Minuten lang statisch belastet.

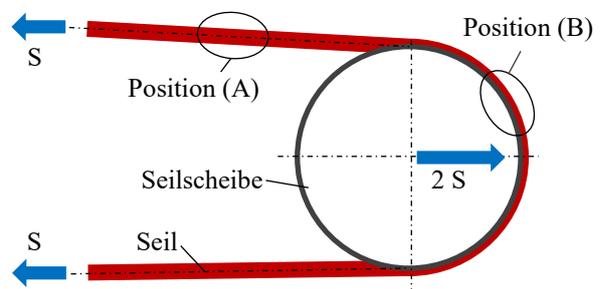


Abbildung 7. Position A und B der Messkörper im Seil

Die Messungen wurden an zwei Stellen im Seil vorgenommen. Im freien Seilbereich (gerades Seil, Abbildung 7, Position A), und im Bereich der Seilscheibe (gekrümmtes Seil, Abbildung 7, Position B). Alle durchgeführten Versuche sind im Versuchsplan in Abbildung 8 dargestellt.

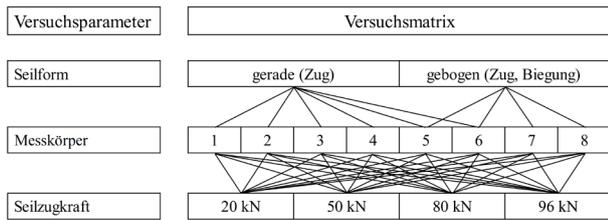


Abbildung 8. Versuchplan der Druckmessungen im Seil [2]

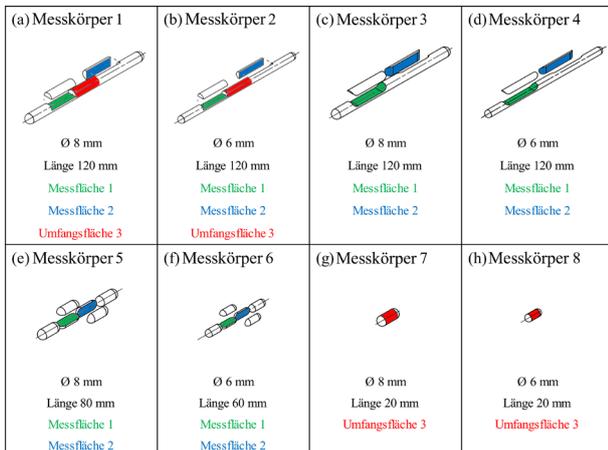


Abbildung 9. Messkörper aus Aluminium mit zugehörigen Messflächen für die Druckmessfolien [2]

Abbildung 9 zeigt die acht verschiedenen Messkörper mit 6 bzw. 8 mm Durchmesser, die zum Einsatz kommen. Weiters sind in der Abbildung die Positionen der Druckmessfolien zwischen zwei Halbzylindern oder an der Mantelfläche der Messkörper dargestellt. Die mittig angebrachten Folien zeigen den mittleren Druck in Normalrichtung dieser Folie, es werden daher jeweils zwei Folien um 90° versetzt verwendet. Die Folien am Kernkörpermantel messen die Druckverteilung am Gesamtumfang.

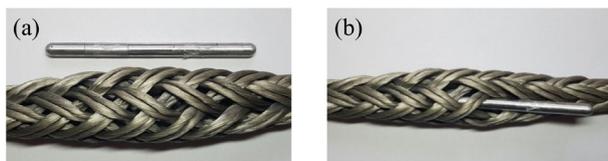


Abbildung 10. Korbformung am entlasteten Faserseil (a) und Einlegen des Messkörpers mit den Druckmessfolien (b) [2]

Das verwendete Seil ist ein geflochtenes UHMWPE-Seil mit 12-Litzenkonstruktion (je 2 Stränge) mit 18 mm Außendurchmesser und 160 mm Schlaglänge. Dieses hat den Vorteil, dass die Messkörper durch Korbformung einfach in das Seil eingelegt und nach der Belastung für die Analyse herausgenommen werden können.

Die Druckmessfolien erhalten eine vom lokalen Maximaldruck abhängige Verfärbung, die anschließend durch Scannen ausgewertet wird. Da jede Folie nur einen bestimmten Druckbereich abdeckt (bei weniger Druck bleibt sie weiß, bei mehr Druck ist sie gesättigt rot), muss die passende Folie durch Probieren oder durch eine bereits erfolgte Abschätzung des erwarteten Drucks gewählt wer-

den. Diese Abschätzung wurde anhand der analytischen Berechnungsergebnisse vor jeder Messung durchgeführt.

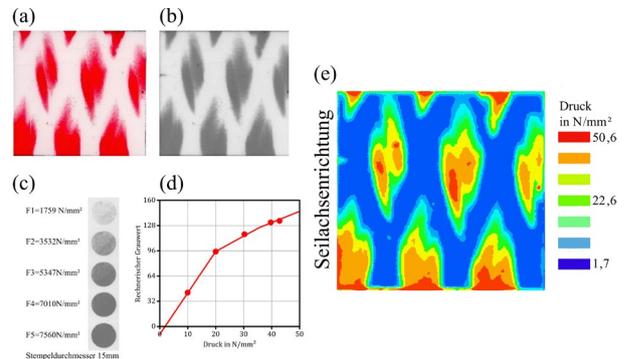


Abbildung 11. Auswertung der Druckmessfolie [2]

Die Auswertung der Druckmessfolien erfolgt in mehreren Schritten. Als Beispiel ist in Abbildung 11 (a) die Druckmessfolie von Messkörper 1, Umfangsfläche 3 im geraden Seil unter Zug in dargestellt. Die Folie wird in Graustufen gescannt (b) und mit unter denselben Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Halte-dauer der Belastung) angefertigter Kalibrierpunkten mit jeweils bekanntem Druck (c) verglichen. Die Kalibrierpunkte erzeugen eine linear interpolierte Kalibrierkurve (d) mit dem zum jeweiligen Grauwert passenden Druck. Diese ermöglicht die Berechnung des während der Messung maximal vorhandenen Drucks auf die Folie in jedem Punkt (e).

2.3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse für ein Faserseil mit dem Durchmesser $d = 22,2$ mm, Schlagwinkel 14° bzw. Schlaglänge 165 mm mit einem eingelegten Kernkörper mit $d_A = 8$ mm sind in Abbildung 12 dargestellt. Das Seil ist mit $S = 73$ kN belastet, die für die Berechnung sowie für die Messungen verwendete Seilrolle hat einen Radius von 222 mm mit einem Seilrillendurchmesser von 22,5 mm bei einem Rillenöffnungswinkel von 70° . Das geflochtene Seil für die Messung mit Druckmessfolien hat einen Durchmesser ohne eingelegten Messkörper von 18 mm. Mit eingelegtem Messkörper im Kern beträgt der Seildurchmesser wie in der analytischen Berechnung etwa 22-23 mm.

Abbildung 12 (a) und (b) zeigen den berechneten und gemessenen Kontaktdruck auf den Messkörper im geraden sowie gekrümmten Seil. Die großen Ausschläge in den experimentellen Betrachtungen stammen von den Faserbündeln, die sich im geflochtenen Seil nicht wie im Spiralseil vollständig an den Messkörper anschmiegen können.

In Abbildung 12 (c) ist der Anstieg des mittleren Drucks bei Erhöhung der Seilzugkraft im geraden Seil dargestellt. Der lineare Anstieg bei Erhöhung der Seilzugkraft sowie die Höhe der Kontaktkraft zwischen Seil und Messkörper aus Gleichung (1) konnte im Experiment gut nachvollzogen und belegt werden.

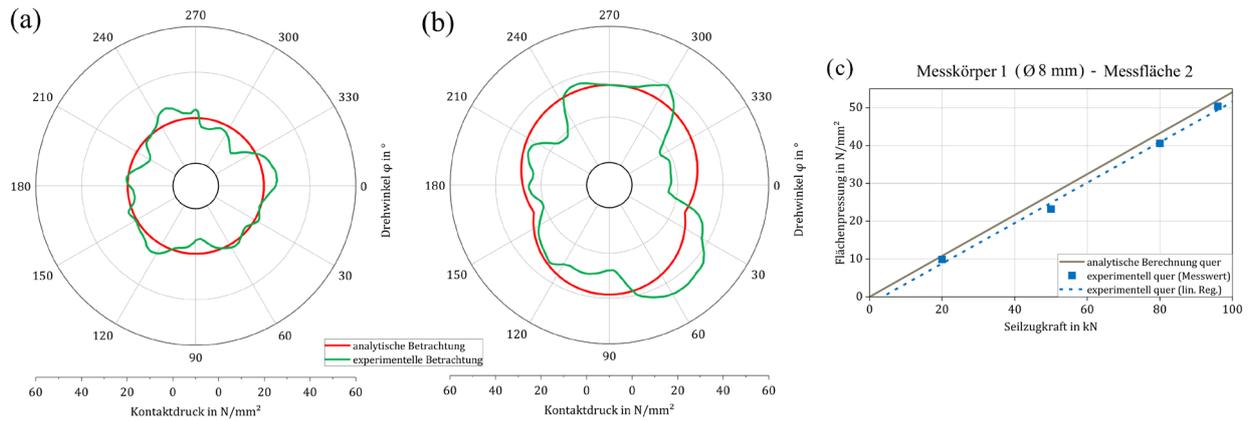


Abbildung 12. Vergleich der Ergebnisse aus analytischer Berechnung und Messungen mit Druckmessfolien: Druckverteilung am Umfang im geraden Seil (a), im gekrümmten Seil (b) und mittlerer Druck in Abhängigkeit von der Seilzugkraft (c) [2]

3 WERKSTOFFE FÜR DIE ELEKTRISCHEN LEITER

Nach einer Vorauswahl wurden einige Materialien (gelistet in Abbildung 14) untersucht, die möglicherweise die gestellten Anforderungen erfüllen. Auf einer Zugprüfmaschine wurden Belastungszyklen mit verschiedenen Dehnungen aufgebracht und währenddessen der elektrische Widerstand der Probe gemessen (Abbildung 13).

Die im Zugversuch verglichenen Materialien können in die drei Gruppen metallische Leiter, mit leitfähigen Partikeln beschichtete Fasern und Elastomer-Extrudate mit leitfähigen Füllstoffen eingeteilt werden.

3.1 MESSUNG VON DEHNUNGSVERHALTEN UND ELEKTRISCHEM WIDERSTAND

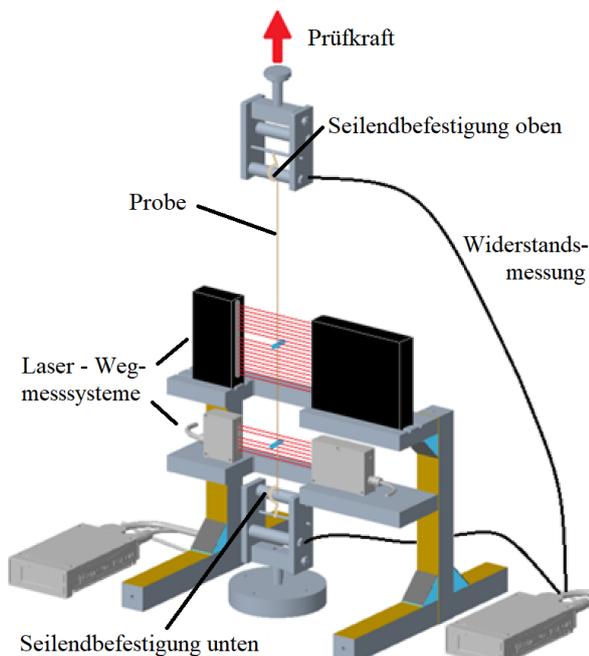


Abbildung 13. Aufbau für die Vermessung der Drähte/Fäden

Die Messungen wurden auf der Zug-Druck-Universalprüfmaschine Zwick AllroundLine Z250 durchgeführt, Abbildung 13 zeigt den genutzten Prüfaufbau. Zusätzlich zu den von der Prüfmaschine erfassten Messdaten Zugkraft und Dehnung wurde der elektrische Widerstand zwischen den beiden Draht-/Fadenendbefestigungen gemessen. Diese Endbefestigungen bestehen aus drei Umwicklungen auf einem Aluminiumzylinder mit Ø 20 mm. Zur Aufnahme der Restkraft wird das übrige Drahtstück um einen Stab gebogen bzw. der restliche Faden daran festgebunden.

3.1.1 KRAFTMESSUNG

Die in der Faser wirkende Zugkraft wurde mit einem Zwick-Roell Xforce P Kraftaufnehmer mit Nennkraft 1 kN gemessen. Da das Messsystem im Seilkern keine lasttragende Wirkung hat, ist die Festigkeit des Leitermaterials für die Auswahl nicht ausschlaggebend. Die gemessene Kraft wird für das Aufbringen der Vorspannung sowie zum Ermitteln der elastischen Dehnbarkeit benötigt.

3.1.2 DEHNUNGMESSUNG

Die Zug-Druck-Prüfmaschine gibt die Position der Traverse, an der die obere Seilendbefestigung fixiert ist, als Messgröße aus. Durch Setzen der Dehnungs-Nullstelle bei einer bestimmten, kleinen Vorspannung konnten die unvermeidlichen Längenunterschiede zwischen den Proben berücksichtigt werden. Bei dieser von Material und Querschnitt nach DIN EN ISO 2062 [6] gewählten Vorspannung wurde die Ausgangslänge l_0 bestimmt. Davon abhängig wurden die Traversenpositionen für gewünschte Dehnungen ermittelt und von der Maschine zyklisch angefahren. Die ertragbaren Dehnungen für die Zyklusversuche wurden in zuvor durchgeführten Testversuchen ermittelt.

Es kann kein exakter Grenzwert für die Dehnung, die das Material ertragen muss, vorgegeben werden. Die elastische Dehnung sollte größer als ungefähr 5%, die Bruchdehnung größer als 10% sein.

3.1.3 BERÜHRUNGSLOSE DEHNUNGSMESSUNG EINES LEITERABSCHNITTS

Durch die unterschiedlichen Reibungs- und Dehnungseigenschaften der Materialien kommt es auf dem Spannzylinder der Endbefestigungen zu unterschiedlich stark ausgeprägtem Nachrutschen bei Belastung. Um dies ermitteln und berücksichtigen bzw. bei Bedarf die Messung abbrechen und wiederholen zu können, wurde die Dehnung des Prüfmateri als zusätzlich berührungslos gemessen.

Zwei kleine Kugeln wurden bei 10% und 90% der freien Messlänge an der Probe angebracht. Die Laser-Wegmesssysteme bestimmten die vertikalen Positionsänderungen der Kugeln durch deren Abschattung (Abbildung 13). Aus der Differenz beider Positionen konnte die Dehnung des Probenmaterials zwischen den Kugeln ermittelt werden, in dem Fall ohne Einfluss von eventuellem Rutschen an den Zylindern der Endbefestigungen.

3.1.4 MESSUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDS

Der elektrische Widerstand ist eine Messgröße, die diese Versuche von standardmäßigen Zugversuchen von Draht- und Fasermaterialien unterscheidet. Die Endverbindungen der elektrischen Leiter müssen leitfähig und gleichzeitig gegenüber dem Rest der Maschine isoliert sein. Der Einfluss des Übergangswiderstands zwischen Leiter und Endverbindung wurde bei jeder Probe untersucht und hatte keinen signifikanten Einfluss, sobald eine kleine mechanische Spannung an der Probe aufgebracht wurde und diese dadurch fest am Aluminiumzylinder auflag.

Auch für den elektrischen Widerstand gibt es keinen exakt vorgegebenen Grenzwert. Als grober Richtwert kann 10 Ohm/m bei 1 mm² Leiterquerschnitt verwendet werden. Damit ist die Versorgung der elektronischen Messknoten über mehrere 100 m Seillänge möglich. Ein kleinerer Widerstand ist wünschenswert, dann wird ein kleinerer Leiterquerschnitt ermöglicht und/oder mehr Messknoten können gleichzeitig versorgt werden.

3.2 ERGEBNISSE

Einige Messergebnisse sind in Abbildung 14 zusammengefasst. Der elektrische Widerstand wurde jeweils für einen einzelnen Draht oder einen einzelnen Faden ermittelt. Dieser kann deutlich gesenkt werden, indem das Material mehrmals parallel nebeneinander im Seil verwendet wird, wenn der Querschnitt des Einzelleiters das zulässt.

In Zyklusversuchen wurde die zeitliche Entwicklung des elektrischen Widerstands untersucht. Dieser bleibt konstant (Abbildung 15) oder steigt an (Abbildung 16). Es konnten progressive und degressive Erhöhungen beobachtet werden. Eine Probe (Steeltech 100) zeigt sprunghafte Anstiege des Widerstands, mit konstantem Widerstand dazwischen. Diese Sprünge entstehen, wenn einer der in der Probe integrierten dünnen Drähte reißt.

3.2.1 METALLISCHE LEITER

Die metallischen Leiter, die entweder aus einem einzelnen Metalldraht oder aus Kunststofffasern mit dünnen, durchgehenden Metalldrähten bestehen, konnten besonders mit guter elektrischer Leitfähigkeit überzeugen. Die rein metallischen Drähte haben einen elektrischen Widerstand unter 1 Ohm/m. Bleibt die Dehnung gering genug (z.B. Steeltech 100 bei 200 Zyklen mit 1% Dehnung, siehe Abbildung 15), tritt keine signifikante Widerstandsänderung auf. Nachteilig ist die begrenzte elastische Dehnbarkeit, teilweise liegt diese deutlich unter 1%, wodurch diese Materialien für diese Anwendung ausscheiden.

Bereits durchgeführte Versuche mit Kupferdrähten im Seil führten zu Schlaufenbildung bei Entlastung [7]. Eine mögliche Lösung für unzureichende Dehnbarkeit lässt sich bei Messsystemen für Faserseile finden, die auf integrierten Glasfasern basieren. Dabei werden die Glasfasern spiralförmig in ein weiches Material eingelegt [8]. Das bedeutet jedoch einen deutlich höheren Fertigungsaufwand.

3.2.2 LEITFÄHIGE PARTIKEL AUF FASERN

Das Grundmaterial dieser Gruppe von elektrischen Leitern ist sehr ähnlich zu den tragenden Seilwerkstoffen. Die bei Verwendung auftretenden elastischen Dehnungen werden daher gut ertragen. Der elektrische Widerstand ist im Vergleich zu den rein metallischen Leitern mit einigen Ohm/m bis einige 100 Ohm/m relativ hoch.

Die laufende Erhöhung des elektrischen Widerstands bei zyklischer Belastung ist unterschiedlich ausgeprägt. Einige Materialien weisen einen degressiven Anstieg je Zyklus auf, also eine immer kleiner werdende Widerstandserhöhung. Dadurch nähert sich der elektrische Widerstand selbst bei sehr hoher Zykluszahl einem Grenzwert an und steigt nicht unkontrollierbar weiter.

Der Faden Shieldex® 235/36 HCB x6 (Abbildung 16) weist den niedrigsten Widerstand dieser Gruppe auf. Sein Anfangswiderstand verdoppelt sich bei 400 Zyklen mit jeweils 5% Dehnung ungefähr. Die stärkste Erhöhung tritt innerhalb der ersten Zyklen auf, danach erfolgt sie deutlich langsamer. Setzt sich dieser Anstieg fort, steigt der Widerstand bei 10.000 Zyklen in den Bereich von 50 bis 60 Ohm/m. Um weiterhin die gewünschten 10 Ohm/m zu erreichen, muss der Faden sechsmal nebeneinander im Seil genutzt werden. Der Querschnitt beträgt dann etwa 1 mm².

3.2.3 LEITFÄHIGE PARTIKEL IN EXTRUDAT

Die Elastomer-Extrudate besitzen eine sehr große Dehnbarkeit. Die elektrische Leitfähigkeit liegt allerdings weit über dem gewünschten Grenzwert. Dazu kommt, dass diese Extrudate im Gegensatz zu den anderen, dünneren Materialien den verfügbaren Leiterquerschnitt bereits einzeln ausfüllen und daher nicht mehrfach parallel verwendet werden können, um den Widerstand zu senken.

Material	Zusammensetzung	Bruchdehnung (%)	Widerstand (Ohm/m)	Dehnung im Zyklusversuch (%)	Widerstandsentwicklung
----------	-----------------	------------------	--------------------	------------------------------	------------------------

Metallische Leiter:

Aluminium	handelsüblicher Draht	21	0,5	-	-
AMANN Steeltech 100	Polyester - Edelstahldraht	15	50	2	konstant/sprunghaft
Federstahl	handelsüblicher Draht	3	0,8	1	konstant
Kupfer	handelsüblicher Draht	11	0,7	-	-
Silber	handelsüblicher Draht	29	0,4	2	konstant

Leitfähige Partikel auf Fasern:

AMANN Silvertex	Polyamid/Polyester - Silber	23	80	8	degressiv
Shieldex® 400 µ Monofil	Polyamid/Nylon - Silber	24	250	-	-
Shieldex® 117/17 HCB	Polyamid/Nylon - Silber	25	120	5	degressiv
Shieldex® 117/17 HCB x2	Polyamid/Nylon - Silber	25	80	5	degressiv
Shieldex® 235/36 HCB x2	Polyamid/Nylon - Silber	26	30	7	degressiv
Shieldex® 235/36 HCB x4	Polyamid/Nylon - Silber	27	20	6	degressiv
Shieldex® 235/36 HCB x6	Polyamid/Nylon - Silber	28	10	5	degressiv

Leitfähige Partikel in Elastomer-Extrudat:

MTC AGAL Elastomer	Füllstoff versilbertes Aluminium	>100	-	-	-
MTC AGCU Elastomer	versilbertes Kupfer	>100	-	-	-
MTC AGGL Elastomer	versilbertes Glas	>100	-	-	-
MTC AGNIC Elastomer	vernickeltes Graphit	>100	250	6	progressiv

Abbildung 14. Untersuchte leitfähige Materialien mit ausgewählten ermittelten Kennwerten

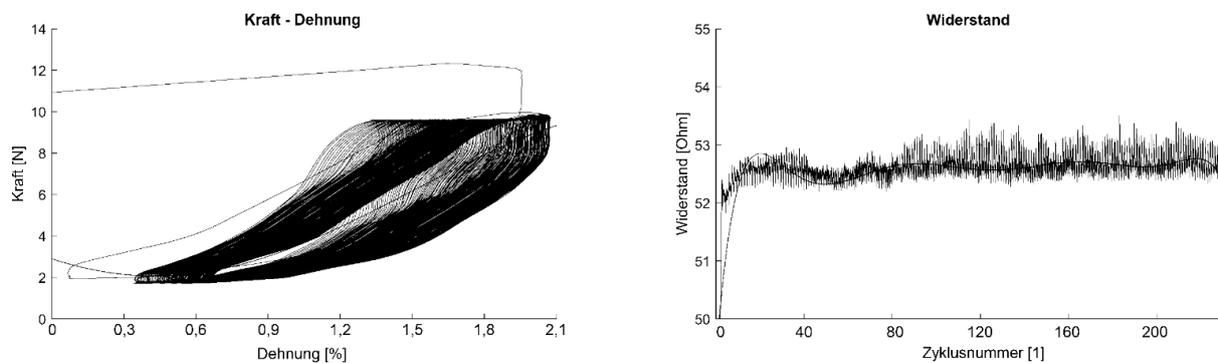


Abbildung 15. 200 Zyklen mit 2% Dehnung für Fasermaterial mit dünnem Edelstahldraht: konstanter elektrischer Widerstand

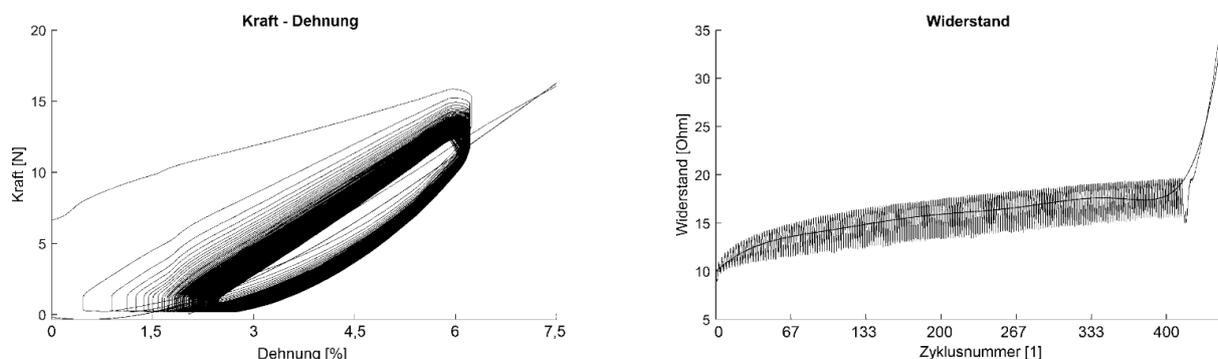


Abbildung 16. 400 Zyklen mit 5% Dehnung für Fasermaterial mit leitfähigen Partikeln: ausreichend hohe Dehnbarkeit, jedoch (degressiver) Anstieg des elektrischen Widerstands mit jedem Zyklus

4 ZUSAMMENFASSUNG

Es konnten wichtige Erkenntnisse für ein Messsystem zur Zustandsermittlung von Faserseilen gewonnen werden.

Die mechanischen Belastungen auf die Schutzhülle können analytisch abgeschätzt werden. Diese Berechnungen wurden mithilfe von Druckmessfolien im Versuch überprüft. Bei dem untersuchten Seil beträgt der mittlere Druck auf die Schutzhülle bei Nennlast am Seil etwa 50 MPa. Die Druckverteilung ist im geraden Seil gleichmäßig am gesamten Umfang verteilt. Im gekrümmten Seil auf der Seilscheibe treten in der Biegung außen und innen die maximalen Druckkräfte auf. Dieser kritische Fall ist für die mechanische Auslegung der Schutzhülle zu verwenden.

Eine Stahlschutzhülle mit den geforderten 2,25 mm Innendurchmesser kann nach ersten Abschätzungen die ermittelten Belastungen bei einem Außendurchmesser von etwa 5-6 mm dauerhaft ertragen. Dieser Durchmesser liegt im akzeptablen Bereich für den Einsatz im Seilkern.

Verschiedene Materialien wurden für den Einsatz als elektrische Leiter im Seil untersucht. Ein Werkstoff, der sowohl über sehr hohe Dehnbarkeit als auch sehr gute Leitfähigkeit verfügt, konnte nicht gefunden werden.

Am besten geeignet scheinen die mit Silberpartikeln beschichteten Faserwerkstoffe, insbesondere Shieldex® 235/36 HCB x6. Diese haben ausreichend hohes Dehnungsvermögen, der elektrische Widerstand liegt aber an der Obergrenze der Zielvorgabe und steigt zusätzlich mit Dehnungszyklen an. Die Elektronik der Messknoten muss daher möglichst energieeffizient ausgelegt werden, um trotz des von diesen elektrischen Leitern verursachten Vorwiderstandes in Höhe einiger Kiloohm zu funktionieren.

5 AUSBLICK

Die nächsten Schritte im Entwicklungsprozess sollen zu einem ersten Prototyp des Messsystems führen, in dem alle Komponenten gemeinsam verwendet werden.

Die Schutzhüllen werden für die ermittelten Belastungen ausgelegt und können dann in einem Testseil, ähnlich den Versuchen mit den Druckmessfolien, auf ausreichende Festigkeit geprüft werden. Die Leitfähigkeit der Leiter ist für diesen ersten Prototyp ausreichend, kann aber später eventuell durch zusätzliches Beschichten mit leitfähigem Lack oder ähnliche Maßnahmen erhöht werden.

Der Prototyp soll einige Meter des Messsystems mit mehreren Messknoten umfassen und die Funktion aller Komponenten gemeinsam zeigen. Bei erfolgreichen Tests des Prototyps folgt darauf der Einbau des Messsystems in ein Faserseil, wo es unter anwendungsnahen Bedingungen am Prüfstand weiter getestet und verbessert werden kann.

Literatur

- [1] Ferrari M., Kartnig G., Entwicklung einer multifaktoriellen Messmethode für die Zustandsüberwachung von Faserseilen für Krane. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2021
- [2] Emathinger G., Belastungen auf einen festen Körper im Inneren eines Faserseils: Analytische, numerische und experimentelle Untersuchungen [Unveröffentlichte Diplomarbeit]. Technische Universität Wien, 2022.
- [3] Leech C., Reader, J. Hearle, M. Overington, S. Banfield, Modelling Tension and Torque Properties of Fibre Ropes and splices, 1993.
- [4] Feyrer K., Wehking K.-H., FEYRER: Drahtseile, 2018. doi:10.1007/978-3-642-54296
- [5] Donandt H., Über die Berechnung von Treibscheiben im Aufzugbau, 1927.
- [6] DIN EN ISO 2062:2010-04: Textilien - Garne von Aufmachungseinheiten - Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungs-geschwindigkeit, 2010.
- [7] Stüve J., Erhöhung der Funktionssicherheit von gewebten und geflochtenen lastaufnehmenden Bändern und Seilen für industrielle Anwendungen und Extremsportbereiche durch Integration von Sensoren für die Belastungs- und Verschleißkontrolle, 2005.
- [8] O'Hear N., Optical Scanning Apparatus for Ropes nondestructive test monitoring system, OCEANS, 2003

Dipl.-Ing. Marco Ferrari studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Wien und ist als Universitätsassistent am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung tätig.

Telefon: +43 1 58801 - 307 20
Email: marco.ferrari@tuwien.ac.at

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Georg Kartnig ist Professor und Institutsvorstand am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung an der Technischen Universität Wien sowie Vize-Präsident der WGTL E.V.

Telefon: +43 1 58801 - 307 48
Email: georg.kartnig@tuwien.ac.at
Adresse: Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Lehargasse 6, 1060 Wien, Österreich