

Entwicklung einer multifaktoriellen Messmethode für die Zustandsüberwachung von Faserseilen für Krane

Development of a Multifactorial Method for Condition Monitoring of Fiber Ropes for Cranes

Marco Ferrari
Georg Kartnig

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Technische Universität Wien

Hochfeste Faserseile haben zahlreiche Eigenschaften, 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 Bestimmung der technisch-wirtschaftlichen Wertigkeit verschiedener Messverfahren konnte eine vielversprechende Kombination gefunden werden, die mehrere Seileigenschaften an Abschnitten über die gesamte Seillänge erfassen kann. Das zu entwickelnde Messsystem besitzt zwei elektrische Leiter im Seil, die in regelmäßigen Abständen durch Messknoten elektronisch verbunden sind. Die erfassbaren Seileigenschaften, deren Messung und die Komponenten des Messsystems werden beschrieben.

[Faserseil, Zustandsüberwachung, Seileigenschaften, Messverfahren, elektrische Leiter]

High strength fiber ropes for cranes have many different properties. Some of these can be used to monitor the condition of the rope. Methods that allow measuring these properties are rated according to their technical and economical suitability for condition monitoring. Some of the best-suited methods are combined to a new measurement system that consists of two electrical conductors with uniformly distributed measurement points in the rope. It is able to capture rope properties at each of the resulting rope sections. The detectable properties, their measurement and a potential implementation of the system is described.

[fiber rope, condition monitoring, rope properties, measuring method, electrical conductors]

1 EINLEITUNG

Hochfeste Faserseile bieten gegenüber Stahlseilen Vorteile bei der Verwendung auf Kranen, jedoch fehlen sichere automatisierte Methoden zur Zustandsüberwachung. Es gibt viele verschiedene Ansätze zum Monitoring von Faserseilen, die auf unterschiedlichen Messverfahren und Seileigenschaften beruhen. [OSF17, RCG+00, SFG19]

Ziel dieses Projektes ist es, durch Kombination bekannter Messverfahren ein technisch umsetzbares Messsystem für die Seilzustandsermittlung zu entwickeln, das in Zukunft bei Kranen mit Faserseilen verwendet werden kann. Für diese Aufgabe können folgende Forschungsfragen formuliert werden:

- Welche Seileigenschaften ermöglichen die Abschätzung des aktuellen Seilzustandes?
- Welche Messmethoden können zur Erfassung dieser Eigenschaften eingesetzt werden?
- Wie kann ein Messsystem umgesetzt werden, welches diese Eigenschaften lokal an jeder Stelle im Seil erfasst?

2 UNTERSUCHUNG UND VERGLEICH EXISTIERENDER MESSMETHODEN

Im ersten Schritt wurden unterschiedliche Seileigenschaften und Messverfahren gesucht und kategorisiert, technisch und wirtschaftlich bewertet und zum zu entwickelnden Messsystem kombiniert.

2.1 STAND DER WISSENSCHAFT

Es wurden über 150 Quellen über an Faserseilen angewandte Messverfahren und Seileigenschaften, insbesondere bei Seilen für Fördertechnik und Offshore-Vertäuung, untersucht. Dabei wurde keine zeitliche Eingrenzung getroffen. Eine erhöhte Forschungstätigkeit kann in den letzten 25 Jahren beobachtet werden. Besonders seit 2010 wird dieses Thema häufiger untersucht, wie Abbildung 1 zeigt.

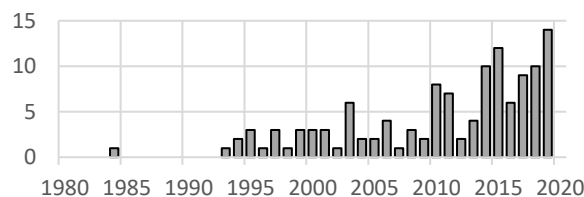


Abbildung 1. Literaturquellen nach Erscheinungsjahr

Es konnten verschiedenste Messverfahren gefunden und in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Zerstörendes oder nicht zerstörendes Verfahren
- System im Seil/außerhalb des Seils oder beides
- lokale oder globale Messung (über Seillänge)
- physikalisches Messprinzip, z.B. optisch, magnetisch, akustisch, ...

2.2 TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

Basierend auf den Literaturquellen wurde die technisch-wirtschaftliche Wertigkeit der darin beschriebenen Messverfahren ermittelt. Der Fokus lag dabei auf der technischen Eignung. Eine einfache wirtschaftliche Bewertung wurde ebenfalls durchgeführt.

2.2.1 GEWICHTUNG DER SEILEIGENSCHAFTEN FÜR DIE TECHNISCHE BEWERTUNG

Für die Ermittlung der technischen Wertigkeit der Messverfahren wurde zuerst den verschiedenen Seileigenschaften ein Gewichtungsparemeter P_i , basierend auf den in Abbildung 1 dargestellten Literaturquellen, zugeordnet. Dieser beschreibt, wie gut diese Eigenschaft verwendet werden kann, um auf den Seilzustand rückzuschließen und gegebenenfalls die Ablegereife festzustellen. Abbildung 2 zeigt einige Eigenschaften mit hoher Gewichtung.

Seileigenschaft	Kurzbeschreibung	Gewichtung P_i
plastische Dehnung/ Kriechen	bleibende Dehnung des Seils oder Seilabschnitts (bei definierter Last)	10
E-Modul/ Steifigkeit	axiale Steifigkeit des Seils, z.B. zusätzliche Dehnung bei Lastaufnahme	9
Durchmesser Seil	Seildurchmesser (unterschiedliche Messrichtungen bei unrundem Querschnitt)	8
Seiltemperatur	Temperatur im inneren oder äußeren des Seils	7
...

Abbildung 2. Auswahl von hochgewichteten Seileigenschaften

Eine Seileigenschaft, die eng mit dem Seilzustand zusammenhängt, ist die Seildehnung. Diese lässt sich durch plastische Dehnung und elastische Dehnung beschreiben. In Abbildung 3 sind beide Eigenschaften über die Seillebensdauer am Prüfstand dargestellt. Die Versuche wurden mit einem LCP-Seil (Flüssigkristallpolymer) auf einem Rollenprüfstand durchgeführt, der den Einsatz des Seils am Kran simuliert. Jeder Zyklus entspricht dem Überrollen einer Seilrolle mit definierter Last und damit einem Biegewechsel. Weitere für den Versuch festzulegende Kennwerte sind unter anderen Seilrollendurchmesser, Gleich- oder Gegenbiegung, Temperatur und Seilgeschwindigkeit. [BC98]

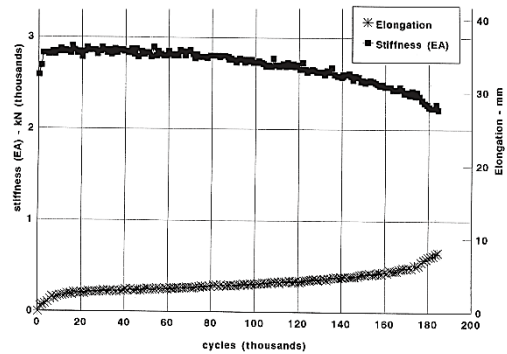


Abbildung 3. Änderung der Steifigkeit und Dehnung eines LCP-Seils über dessen Lebensdauer [BC98]

Die plastische Dehnung (elongation) bleibt bei Seilentlastung bestehen. Wie erwartet wächst diese Eigenschaft kontinuierlich mit der Seilnutzungsdauer. [Weh17]

Mit den elastischen Anteilen der Dehnung wird bei verschiedenen bekannten Lasten die Steifigkeit (stiffness) oder der Elastizitätsmodul des Seils berechnet. In Abbildung 3 ist ersichtlich, dass die Steifigkeit nach dem kurzen Anstieg aufgrund von Setzungen in der Seilkonstruktion mit zunehmenden Lastspielen kontinuierlich sinkt [BC98].

Die Seiltemperatur als weiteres Beispiel kann in doppelter Weise genutzt werden. Das Fasermaterial ist im Allgemeinen empfindlich gegenüber erhöhten Temperaturen, materialabhängig teilweise bereits deutlich unter 100 °C [Weh17]. Schon die kurzzeitige Erhitzung eines Seilabschnitts kann zu massiver Schädigung und Festigkeitsverlust führen. Eine Temperaturüberwachung kann diese Beschädigung durch vorzeitige Warnung bei verdächtigem Temperaturanstieg eventuell verhindern. Im Falle einer bereits erfolgten Überschreitung der zulässigen Temperatur soll diese Information zur genaueren Untersuchung des Seilabschnitts vor der Weiterverwendung des Seils führen.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der gemessenen Temperaturwerte ergibt sich, wenn diese sehr genau gemessen werden können. Die vom Seilzustand abhängige innere Reibung und Dämpfung verändern die Erwärmung des Seils im Einsatz, wie in Abbildung 4 zu erkennen ist.

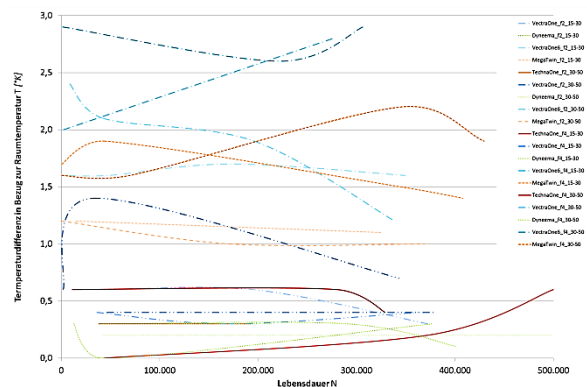


Abbildung 4. Erwärmung durch innere Reibung im Betrieb bei verschiedenen Seilen (Material und Machart) [Weh17]

2.2.2 ERMITTLUNG DER TECHNISCHEN WERTIGKEIT

Jedes betrachtete Messverfahren kann eine oder mehrere Seileigenschaften erfassen. Um dies in die Wertigkeit miteinfließen zu lassen, wird eine Matrix mit den Seileigenschaften und Messverfahren erstellt, die in den Zellen die Fähigkeit des Messverfahrens k (Zeilen) zur Ermittlung der Seileigenschaft i (Spalten) enthält, siehe Abbildung 5. Mit dem Messverfahren nicht messbare Eigenschaften erhalten den Wert 0 und haben somit keinen Einfluss auf die technische Wertigkeit des Messverfahrens, messbare Eigenschaften erhalten die Gewichtung 1 bis 3.

- T_k ... technische Wertigkeit des Messverfahren k , z.B. Infrarotmessung, Röntgen, ...
- $T_{k,i}$... Fähigkeit des Messverfahrens k , die Seileigenschaft i zu messen (Gewichtung 0 bis 3)
- P_i ... Gewichtung der Seileigenschaft i , z.B. Dehnung, Querschnittsform, Temperatur, ...

Abbildung 5 zeigt den Bewertungsvorgang anhand eines Ausschnitts der Bewertungstabelle mit den zuvor bestimmten Seileigenschafts-Gewichtungen P_i . Die technische Wertigkeit eines Messverfahren T_k ergibt sich als zeilenweise Summe der Produkte aus Seileigenschafts-Gewichtung P_i und der jeweiligen Messfähigkeit $T_{k,i}$:

$$T_k = \sum_i P_i \cdot T_{k,i} \quad (1)$$

Gewichtungs- matrix $T_{k,i}$	technische Wertigkeit T_k	Durchmesser	Dehnung	E-Modul	...	Temperatur	Innere Reibung	...
		Gewichtung Seileigenschaft P_i	8	10	9		6	6
optisch leitfähige Fasern	183	0	3	2		2	0	
Infrarotmessung	84	0	0	0		3	1	
Ultraschallmessung	105	1	2	1		0	3	
...		Σ		*				
elektr. Leitfähige Fasern/Drähte	151	0	3	2		0	0	
...								
Kombination	220	0	3	2		3	1	

Abbildung 5. Ausschnitt der Bewertungstabelle

Man erhält mit der technischen Wertigkeit ein Maß dafür, wie gut sich der Seilzustand mit den durch das Verfahren erfassbaren Seileigenschaften ermitteln lässt. Dieser Wert ist die technische Wertigkeit des Messverfahrens.

2.2.3 ERMITTLUNG DER WIRTSCHAFTLICHEN WERTIGKEIT

Die wirtschaftlichen Randbedingungen der verschiedenen Messverfahren wurden ebenfalls betrachtet. Die dabei verwendeten Faktoren beinhalten den voraussichtlichen Entwicklungsaufwand bis zum einsetzbaren System D_k , die Kosten für Sensorik und Materialien S_k sowie den Aufwand für erforderliche Anpassungen am Seil R_k und am Kran C_k . Sie sind jeweils von 0 (extremer Aufwand/Kosten) bis 4 (sehr geringer Aufwand/Kosten) bewertet.

- E_k ... wirtschaftliche Wertigkeit des Messverfahrens k (economic)
- D_k ... Entwicklungsaufwand (development)
- S_k ... Sensorik, Materialien (sensors)
- R_k ... Integration ins Seil (rope integration)
- C_k ... Adaption des Krans/Kranbetriebs (crane)

$$E_k = D_k + S_k + R_k + C_k \quad (2)$$

Die wirtschaftliche Wertigkeit E_k ergibt sich als Summe der vier Teilbewertungen. Die maximale wirtschaftliche Wertigkeit eines Messverfahren, also bei Einsatzfähigkeit mit minimalen Kosten und Aufwand, beträgt $E_{max} = 4 + 4 + 4 + 4 = 16$.

2.2.4 TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHE WERTIGKEIT

Die technischen und wirtschaftlichen Wertigkeiten ausgewählter Messverfahren sind in Abbildung 6 gezeigt:

- A: ... Infrarotmessung → Seilaußentemperatur
- B: ... elektr. leitfähige Fasern → elektr. Widerstand/Leiterschädigung
- C: ... elektr. leitfähige Fasern → Signallaufzeit/Dehnung
- D: ... Sensoren im Seil → Temperatur, ...
- E: ... optisch leitfähige Fasern → Signallaufzeit/Dehnung, Temperatur
- F: ... Mikroskopie → Faserbrüche, Strukturänderungen, Verschmutzungen
- B+C+D: ... Kombination elektr. leitfähige Fasern mit im Seil integrierten Sensoren → Laufzeit/Dehnung, elektr. Widerstand/Leiterschädigung, Temperatur

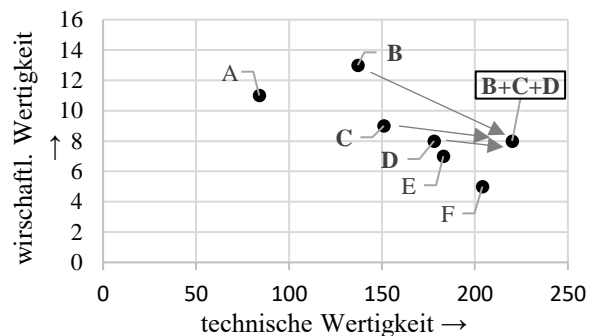


Abbildung 6. technische und wirtschaftliche Wertigkeit

2.2.5 KOMBINATION ZUM MULTIFAKTORIELLEN MESSVERFAHREN

Mit den untersuchten Methoden können kombinierte Messverfahren zusammengestellt werden. Beispielsweise kann an den für Signallaufzeitmessungen ins Seil eingebrachten elektrischen Leitern zusätzlich eine Widerstandsmessung durchgeführt werden. Da für die Signallaufzeit- und Widerstandsmessung von Seilabschnitten elektronische Komponenten im Seil erforderlich sind, können diese mit Temperatursensoren ergänzt werden. Damit ergibt sich das in Kapitel 3 beschriebene kombinierte, multifaktorielle Messsystem (letzte Zeile in Abbildung 5, Eintrag B+C+D in Abbildung 6). Dieses erreicht durch die Kombination eine höhere technische Wertigkeit als die einzelnen Messverfahren für sich, während sich der Aufwand und damit die wirtschaftliche Wertigkeit nur unwesentlich ändern.

3 KOMBINIERTES MULTIFAKTORIELLES MESSVERFAHREN

3.1 GRUNDLEGENDER AUFBAU

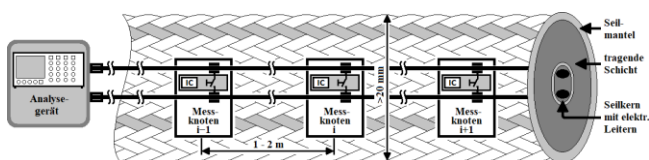


Abbildung 7. Prinzipische Skizze des Messsystems

Bei dem in Abbildung 7 und 8 gezeigten Messsystem werden elektronische Messknoten in regelmäßigen Abständen in den Seilkern eingebracht. Diese sind durch zwei durchgängige elektrische Leiter verbunden, die sich über die gesamte Seillänge erstrecken und an einem Seilende an das Analysegerät angeschlossen sind. Dieses beinhaltet die Auswerteelektronik sowie Datenanalyse und -speicher. Zusätzlich ist die Einbindung der erfassten Betriebsdaten des Krans vorgesehen. Es sind somit ein speziell ausgestattetes Seil, Zugang zu einem Seilende sowie eine Schnittstelle zu den Betriebsdaten des Krans erforderlich. Zusätzliche Sensoren am Kran ist für das Messsystem nicht erforderlich.

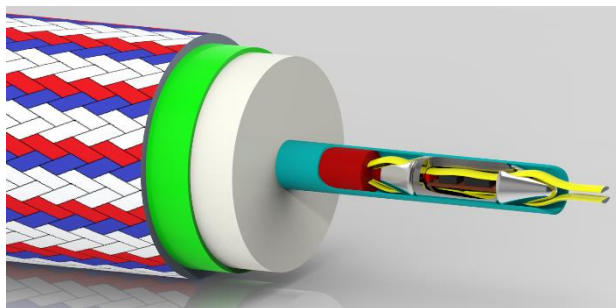


Abbildung 8. Schnittansicht der im Seilkern eingebetteten elektrischen Leiter mit einem Messknoten

Die Messknoten beinhalten einen Microcontroller, wodurch digitale Kommunikation mit dem Analysegerät

ermöglicht wird. Die Messstrecke zwischen zwei Messknoten beträgt jeweils ungefähr ein bis zwei Meter. Dadurch ist die abschnittsweise Messung verschiedener Seileigenschaften wie Dehnung, Steifigkeit, elektrischer Widerstand der Leiter und Temperatur über die gesamte Seillänge möglich.

3.2 ZEITLICHER ABLAUF DES MESSVORGANGS DER SEILEIGENSCHAFTEN IM SEILABSCHNITT

Um die Seileigenschaften eines Seilabschnittes festzustellen, sind einige Schritte notwendig. Die vom Analysegerät jeweils ermittelten Daten sind:

- aktuelle Krantdaten (Last, Seilposition, Umgebungstemperatur, ...)
- Temperatur im Seil
- elektrischer Widerstand der Leiter im Abschnitt (daraus Dehnung und Beschädigung)
- Signallaufzeit im Abschnitt (daraus Dehnung und Steifigkeit)

Diese Schritte erfolgen jeweils innerhalb einiger Millisekunden und sind ab Kapitel 3.4 genauer beschrieben. Das Analysegerät liefert die Energie für die Messknoten und übermittelt den aktuell zu betrachtenden Messknotenindex an alle Messknoten. Diese schalten sich daraufhin, mit Ausnahme des ausgewählten Messknotens, ab. Dieser ermittelt die Temperatur und übermittelt diese digital an das Analysegerät. Wie in Abbildung 13 schließt er dann seinen Transistorschalter zwischen beiden Leitern und ist durch die wegfallende Spannungsdifferenz ebenfalls ausgeschaltet. Das Analysegerät führt nun die Widerstands- und Signallaufzeitmessungen an der nun vorhandenen geschlossenen Leiterschleife durch. Durch abschließende Umpolung der Leiterspannung öffnet sich der Schalter wieder und die Versorgungsspannung kann zur Wahl des nächsten Messknoten aufgebracht werden.

3.3 KOMPONENTENAUSWAHL UND KONSTRUKTIVE UMSETZUNGSMÖGLICHKEITEN

Das Messsystem kann in einige Komponenten aufgeteilt werden, die weitgehend unabhängig voneinander untersucht werden können. In der Entwicklung werden diese Komponenten zuerst theoretisch betrachtet und simuliert, danach werden Prototypen für Funktionstests erstellt. Dabei werden bereits die später unumgänglichen Randbedingungen eines Messsystems im Seil miteinbezogen, zum Beispiel Platzangebot, Energieversorgung, Kommunikation und Widerstandsfähigkeit. Messsystem und Seil dürfen sich im Betrieb gegenseitig nicht beschädigen.

3.3.1 ANALYSEGERÄT

Das Analysegerät befindet sich außerhalb des Seils, daher sind nur wenige Randbedingungen zu berücksichtigen. Es besteht im Grunde aus einer Speicher-/Recheneinheit und einer Messeinheit mit zwei schnellen Analogein-

und -ausgängen. Diese sind mit den beiden elektrischen Leitern im Seil verbunden und ermöglichen die Energieversorgung und Kommunikation mit den Messknoten. Zusätzlich dienen Sie zur Messung des Widerstands und der Signallaufzeit der aktiven Leiterschleife, siehe Kapitel 3.4 bis 3.6. Da das Analysegerät nicht Teil des Seiles ist, muss es nicht mit dem Seil getauscht werden und kann dauerhaft an einem Kran für mehrere Seile verwendet werden.

Die größten Herausforderungen beim Analysegerät liegen bei der Laufzeitmessung. Darunter fallen die Auswahl ausreichend schneller Hardware und die Optimierung der Auswertelgorithmen, die den Messfehler infolge äußerer Einflüsse minimieren sollen. In der Entwicklungsphase werden die Signalgeneratoren und Signalanalysatoren Pico Technology PicoScope 2207b und Red Pitaya STEMLAB 125-14 verwendet. Diese ermöglichen eine Abtastrate von 1 GS/s (10^9 Messwerte pro Sekunde).

3.3.2 MESSKNOTEN

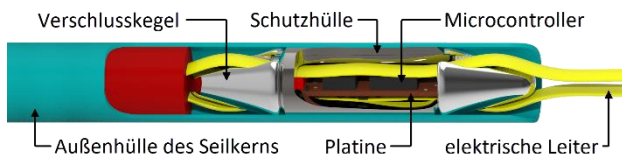


Abbildung 9. Messknoten mit Schutzhülle und elektrischen Leitern in Schnittansicht

Abbildung 9 zeigt einen Messknoten, bestehend aus der Platine und der Schutzhülle, durch die die beiden elektrischen Leiter geführt werden. Er ermöglicht die Messungen auf einen Seilabschnitt von ein bis zwei Meter zu beschränken. Die Platine (Abbildung 11) kann die Leiter elektrisch verbinden oder trennen, die Temperatur messen und mit dem Analysegerät kommunizieren.

Package	DFN 8 Pin
Abmessungen	3 x 2 x 0,9 mm
Versorgungsspannung	1,8 bis 3,6 V
Betriebsstrom (1 MHz, 1,8 V)	25 μ A
max. Taktfrequenz	16 MHz
Programmspeicher / Arbeitsspeicher	1024 / 64 Byte

Abbildung 10. Daten des Microchip PIC10FL322 [Mic21]

Die Hauptkomponente der Platine ist der Mikrocontroller. Die Auswahlkriterien waren kleine Baugröße, ein sehr niedriger Energiebedarf und ein für die Anwendung ausreichender Funktionsumfang. Der PIC10FL322 (Abbildung 10) des Herstellers Microchip bietet bei einem Energieverbrauch von etwa 0,05 mW im Betrieb mehrere Analog-Digital-Wandler, Timer, I/O-Pins und einen Temperatursensor sowie für die Anwendung ausreichend Speicher [Mic21]. Weitere erforderliche Bauteile sind der Spannungswandler, Transistoren, Dioden, Kondensatoren und Widerstände. Die Komponenten werden beidseitig auf der 2,5x10 mm großen Platine angeordnet (Abbildung 11).

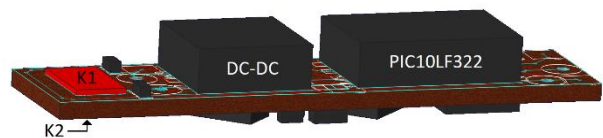
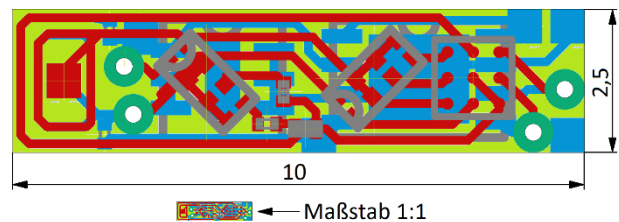


Abbildung 11. Layout und 3D-Modell der Messknoten-Platine

Die Kontaktstellen zu den elektrischen Leitern K1 und K2 liegen auf gegenüberliegenden Seiten der Platine, wodurch eine gegenseitige Berührung verhindert wird. Die Schutzummantelung umschließt und schützt die Elektronik. Der Durchmesser des Messknoten inklusive Schutzhülle beträgt knapp fünf Millimeter.

3.3.3 ELEKTRISCHE LEITER

Abbildung 8 und 9 zeigen den Seilkern, der aus den zueinander isolierten Leitern und den Messknoten mit Schutzhülle besteht, die in einer weiteren Schutzschicht eingebettet sind. Die elektrischen Leiter bilden die Verbindung zwischen Analysegerät und Messknoten. Ihre Anordnung ist so gewählt, dass keine Unterbrechungen an den Messknoten vorhanden sind. Dadurch führt das Versagen einer Kontaktstelle am Messknoten nur zu dessen Ausfall, während die anderen weiterhin einsatzfähig bleiben.

Das Leitermaterial benötigt ausreichend elektrische Leitfähigkeit und genügend Dehnbarkeit ohne bleibende Veränderungen. In Frage kommen elektrisch leitfähig beschichtete Fasern oder metallische Drähte [Gia11]. Neben den materialabhängigen Festigkeitseigenschaften kann die Dehnbarkeit durch spiralförmige Anordnung der Leiter leicht erhöht werden [EHJ+13]. Die zu ertragenden Dehnungen des Seils betragen einige Prozent [Weh17]. Der elektrische Widerstand kann durch den Leiterquerschnitt angepasst werden. Die elektrische Spannung zwischen den beiden Leitern nimmt mit der Entfernung vom Analysegerät ab. Um auch bei den am weitesten entfernten Messkno-

ten bei Einhalten der Grenzwerte der Kleinspannung ausreichend Versorgungsspannung zur Verfügung zu stellen, muss der Leitwert des Materials einen elektrischen Widerstand von maximal 10 Ohm pro Meter ermöglichen. Der dafür erforderliche Querschnitt sollte etwa 2 mm² oder weniger betragen.

3.4 ERMITTLUNG DER LOKALEN TEMPERATUR

Der Microcontroller in jedem Messknoten kann seine Temperatur selber ermitteln. Die Temperaturmessung im Micro-controller basiert auf der temperaturabhängigen Schwellenspannung von Dioden. Abbildung 12 zeigt das temperaturabhängige Messergebnis des internen Analog-Digital-Wandlers. Diese Kalibrierpunkte sind für jeden Microcontroller zu bestimmen [Mic13]. Der digitalisierte Spannungswert wird direkt an das Analysegerät übermittelt und erst dort in die zugehörige Temperatur umgerechnet.

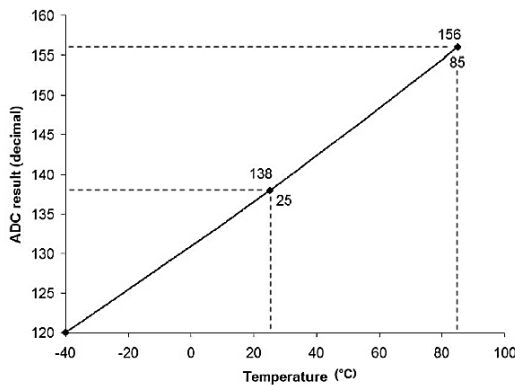


Abbildung 12. Temperaturkalibrierung PIC10LF322 [Mic13]

Die durch die grobe Digitalisierung schlechte Temperatur-Auflösung von etwa drei Grad ist für die Warnung vor kritischen Temperaturen ausreichend. Um allerdings die in Abbildung 4 gezeigte Änderung der Erwärmung durch innere Reibung auswerten zu können, wäre ein zusätzlicher, genauerer Temperatursensor auf der Messknotenplatine erforderlich.

3.5 ERMITTLUNG DER LOKALEN SCHÄDIGUNG DER ELEKTRISCHEN LEITER

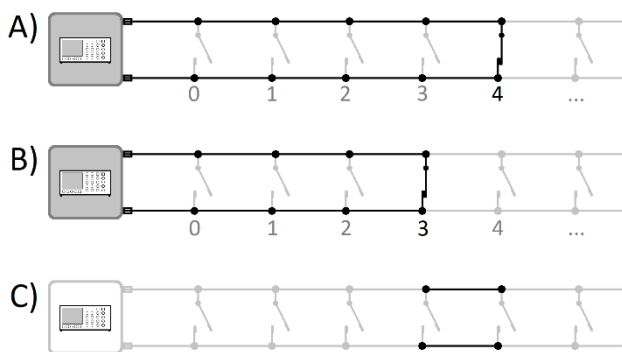


Abbildung 13. Analysegerät mit elektrischen Leitern, die Messknoten Index 0 bis 4 sind vereinfacht als Schalter dargestellt

Abbildung 13 zeigt, wie die Messknoten die beiden elektrischen Leiter elektrisch verbinden können, wenn sie zuvor vom Analysegerät dafür ausgewählt wurden. Die dabei verwendeten Schaltransistoren sind als Schalter dargestellt. Es schließt immer nur ein Messknoten gleichzeitig seinen Schalter, indem der Microprozessor den Transistor schaltet. Dadurch entsteht eine geschlossene Leiterschleife im Seil, die bis zu diesem Messknoten und wieder zum Analysegerät zurückführt und deren elektrischer Widerstand vom Analysegerät gemessen werden kann (A). Wird der Widerstand von der zum benachbarten Messknoten gehörenden Schleife abgezogen (B), erhält man den elektrischen Widerstand der beiden Leiter zwischen den beiden Messknoten und somit eine lokale Seileigenschaft (C).

Die Änderung des elektrischen Widerstandes dieses Abschnitts kann durch die Dehnung der Leiter oder durch deren Beschädigungen entstehen.

3.5.1 WIDERSTANDSÄNDERUNG DURCH SEILDEHNUNG

Unter der Annahme, dass (noch) keine Schäden an den Leitern aufgetreten sind, erfolgt die Längen-/Dehnungsmessung bei Widerstandsänderung analog zu einem Dehnmessstreifen. Die Ausgangslänge l_i ist die betrachtete ungedehnte Seillänge, also ein Abschnitt oder das ganze Seil.

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = n \cdot k \cdot \frac{\Delta l_i}{l_i} = 2 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta l_i}{l_i} \quad (3)$$

Die relative Änderung des Widerstandes $\Delta R_i/R_i$ ist für kleine Dehnungen proportional zur Dehnung $\Delta l_i/l_i$. Der Faktor $n = 2$ kommt durch die gleich gedehnte Hin- und Rückleitung zustande. Der materialabhängige Faktor k kann erst bei gewählten Leitermaterial genau festgelegt werden, als erste Näherung wird $k = 2$ verwendet. [Sti19]

Die Dehnungsmessung mithilfe des Leiterwiderstandes kann als Ergänzung zur Dehnungsmessung über die Signallaufzeit verwendet werden (Kapitel 3.6). Kleine Leiterschäden haben einen geringeren Einfluss als die Dehnung (siehe Kap. 3.5.3).

3.5.2 WIDERSTANDSÄNDERUNG DURCH SCHÄDIGUNG

Treten an den beiden Leitern lokale Schäden wie der Bruch einzelner Drahtlitzen oder Fasern auf, kann das auf eine Beschädigung der Seilstruktur an dieser Stelle hinweisen. In diesem Fall wird in dem Seilabschnitt eine über die Widerstandsänderung durch Dehnung hinausgehende Erhöhung des elektrischen Widerstandes auftreten.

Zuerst wird die mit der Laufzeitmessung ermittelte aktuelle Dehnung verwendet, um die Soll-Widerstandsänderung ohne Schädigung zu berechnen (siehe Kapitel 3.5.1 und Formel 3). Diese wird dann mit der gemessenen Ist-Widerstandsänderung verglichen. Vom Analysegerät festgestellte Schädigungen werden für den betroffenen Seilabschnitt dokumentiert.

3.5.3 FEHLERBETRACHTUNG UND ERFORDERLICHE GENAUIGKEIT BEI DER WIDERSTANDSMESSUNG

Der elektrische Widerstand kann vom Analysegerät ohne großen Aufwand in Milliohm gemessen werden. Der Leiterwiderstand wird mit $10 \Omega/m$ angenommen. Nach Formel 3 entspricht eine Seildehnung von 0,1 % einer Widerstandsänderung von $40 m\Omega$.

Eine minimale Beschädigung und damit Querschnittsverringerung des Leiters von 10 % auf 1 mm Länge entspricht bei Widerstandserhöhung auf $11 \Omega/m$ einer Änderung von $1 m\Omega$. Diese ist, verglichen mit der Änderung durch die Seildehnung, sehr gering, daher sind erst größere Schädigungen davon unterscheidbar.

3.6 ERMITTLUNG DER LOKALEN DEHNUNG UND STEIFIGKEIT DURCH SIGNALLAUFZEITMESSUNG

Um die Dehnung und Steifigkeit des Seils zu erhalten, müssen die lokalen Längenänderungen ermittelt werden. Dies erfolgt über die Messung der Signallaufzeit dt_i vom Analysegerät zum gewählten Messknoten i und wieder zurück (Abbildung 13). Mit der Signalausbreitungsgeschwindigkeit im Material c_m wird die Länge l_i des Seils bis zum Messknoten i errechnet [PS13]:

$$l_i = (dt_i \cdot c_m) / 2 \quad (4)$$

Vergleicht man diese Entfernung mit der gespeicherten Länge im Ausgangszustand des Seils, ergibt sich die Längenänderung und damit die Dehnung. Wird die Längenänderung bei unterschiedlichen bekannten Belastungen am Seil ermittelt, kann daraus der E-Modul bestimmt werden. Analog zu Abbildung 13 erhält man die Länge für den Seilabschnitt zwischen zwei Messknoten mit den Differenzen der dorthin gemessenen Distanzen.

Zur Bestimmung der Signallaufzeit bestehen zwei Möglichkeiten, die sich in der Art des auf einem der elektrischen Leiter aufgetragenen Signals unterscheiden. [PS13]

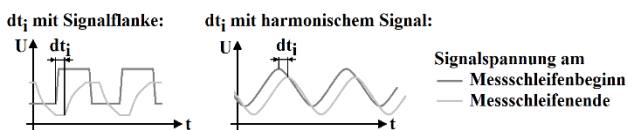


Abbildung 14. Bestimmung der Signalverschiebung dt_i

3.6.1 BESTIMMUNG DER SIGNALVERSCHIEBUNG DURCH FLANKENERKENNUNG

Bei Verwendung eines Impuls-, Rechteck- oder Sägezahnsignals kann die zeitliche Verschiebung der Spannungsanstiege am hin- und rücklaufenden Signal ermittelt werden. Rauschen des Messsignals macht die Ermittlung des genauen Zeitpunkts des Flankenbeginns schwierig. Elektrische Kapazitäten der beiden Leiter und der Bauteile im Seil haben auf den zeitlichen Beginn des Anstiegs wenig Einfluss, flachen diesen aber ab (Abbildung 14 links).

3.6.2 BESTIMMUNG DER SIGNALVERSCHIEBUNG DURCH FOURIERANALYSE

Durch die Ermittlung der Phasenverschiebung des hin- und rücklaufenden Sinus-Signals mittels Fourieranalyse lässt sich bei bekannter Signalfrequenz die zeitliche Verschiebung bestimmen (Abbildung 14 rechts). Der Algorithmus ist sehr stabil gegenüber Signalrauschen und die mögliche Signalfrequenz ist deutlich höher als bei stufenförmigen Signalen. Nachteilig ist, dass die elektrischen Kapazitäten im Seil ebenfalls eine Phasenverschiebung erzeugen. Deren Anteil muss durch Verwendung unterschiedlicher Messfrequenzen herausgerechnet werden, sodass nur die Phasenverschiebung durch die Leiterlänge übrigbleibt.

3.6.3 FEHLERBETRACHTUNG UND ERFORDERLICHE GENAUIGKEIT BEI DER LAUFZEITMESSUNG

Um die Längenänderungen von einigen Promille bis Prozent in den Messabschnitten erfassen zu können, sind bei ein bis zwei Meter Abschnittslänge Genauigkeiten in der Größenordnung von einigen Millimetern notwendig. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals beträgt abhängig vom Leitermaterial etwa $0,7 \times$ Lichtgeschwindigkeit c (ca. 300.000 km/s) [PS13]. Bei Längung des Seilabschnitts um einen Millimeter erhöht sich die Leiterlänge (Hin- und Rückleiter) um zwei Millimeter, die Laufzeitänderung beträgt etwa $10 \cdot 10^{-12} \text{ s} = 10 \text{ ps}$ (Pikosekunden).

Diese Genauigkeit soll durch Mittelwertbildung vieler Messungen erreicht werden. Ähnliche Vorgangsweisen werden bei optischer Laufzeitmessung eingesetzt [EAL+14]. Voraussetzung für die Gültigkeit der Formeln 5 und 6 ist ein zufällig verteilter Fehler der Messwerte v_j .

- dt_i ... Messgröße
- v_j ... mit Fehlern behaftete Werte von dt_i
- \bar{v} ... arithmetischer Mittelwert der v_j
- s ... empirische Standardabw. der Messwerte v_j
- u ... Unsicherheit des gemittelten Messwertes \bar{v}

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j; \quad s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (v_j - \bar{v})^2} \quad (5)$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot s \quad (6)$$

Der erwartete Wert der Messgröße dt_i liegt dann zwischen $\bar{v} - u$ und $\bar{v} + u$. [HS12, PS13]

Bei Messung mit einer Milliarde Messwerten pro Sekunde (1 GS/s) beträgt die zeitliche Auflösung der v_j 1 ns . Die Streuung s liegt mindestens in dieser Größenordnung. Um die Unsicherheit u auf einige Pikosekunden, also etwa ein Hundertstel bis ein Tausendstel, zu verringern, sind $N = 10.000$ bis $N = 1.000.000$ Messungen v_j für ein gemittelt Messergebnis \bar{v} erforderlich. Bei Messsignalfrequenzen im MHz-Bereich dauert die Ermittlung eines Messwertes somit einige Millisekunden bis eine Sekunde.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ausgehend von einer Bewertung verschiedener Messverfahren wurden Temperatur-, elektrische Widerstands- und Laufzeitmessung zu einem Messsystem kombiniert. Dieses ermöglicht mit Hilfe der Betriebsdaten des Krans die Bestimmung mehrerer Seileigenschaften über die ganze Seillänge, nämlich Temperatur, Dehnung, Steifigkeit und Schädigung der eingesetzten elektrischen Leiter.

Da mit der Auswahl und den ersten erfolgreichen Tests des Microcontrollers der nötige Leitwert der elektrischen Leiter bekannt ist, wird der nächste Schritt der Vergleich und die Wahl des Leitermaterials sein. Parallel dazu werden die Programmierung des Microcontrollers und die Bauteile der Messknoten-Platine getestet und diese angefertigt. Weitere Entwicklungsschritte betreffen die Verbindung der Platine mit den Leitern und die Schutzhülle.

Abschließend soll das Gesamtsystem ausführlich getestet werden, zuerst außerhalb des Seils und dann in ein spezielles Faserseil eingebettet. Bei erfolgreicher Entwicklung, Funktionsfähigkeit und guter Aussagekraft der Messwerte über den Seilzustand besteht das Potenzial, dass diese Messmethode auf Kranen zum Einsatz kommt und die Lebensdauer von hochfesten Faserseilen unter Wahrung höchster Sicherheitsstandards weiter verbessert wird.

LITERATUR

- [BC98] Banfield, S.; Casey, N.: *Evaluation of fibre rope properties for offshore mooring*. In: Ocean Engineering 25, Nr. 10, S. 861-879, UK, 1998
- [EAL+14] Eloo, D.; Antman, Y.; Levanon, N. & Zadok, A.: *High-resolution long-reach distributed Brillouin sensing based on combined time-domain and correlation-domain analysis*. In: Optics Express 22, S. 6453-6463, Israel, 2014
- [EHJ+13] Eichhoff, J.; Hehl, A.; Jockenhoevel, S. & Gries, T.: *Textile fabrication technologies for embedding electronic functions into fibres, yarns and fabrics*. In: Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers, S. 191-226, D., 2013
- [Gia11] Giannikopoulos, T.: *Konzepte für die Verschleißmessung von Seilen mit Sensorfäden*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Deutschland, 2011
- [HS12] Hering, E. & Schönfelder, G.: *Messfehler, Messgenauigkeit und Messparameter*. In: Sensoren in Wissenschaft und Technik. Vieweg+Teubner, D., 2012
- [Mic13] Microchip Technology Inc.: *AN1333 - Use and Calibration of the Internal Temperature Indicator*.
- [Mic21] Microchip Technology Inc.: *PIC10(L)F320/322 - 6/8-Pin Flash-Based, 8-Bit Microcontrollers*.
- [OSF17] Oland, E.; Schlanbusch, R. & Falconer, S.: *Condition Monitoring Technologies for Synthetic Fiber Ropes - a Review*. In: International Journal of Prognostics and Health Management, Norwegen, 2017
- [PS13] Plaßmann, W. & Schulz, D.: *Signal- und Systemtheorie*. In: Handbuch Elektrotechnik. Springer Vieweg, D., 2013
- [RCG+00] Rebel, G.; Chaplin, C.; Groves-Kirkby, C. & Ridge, I.: *Condition monitoring techniques for fibre mooring ropes*. In: Insight -Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing 42, UK, 2000
- [SFG19] Schmieder, A.; Felber, A. & Golder, M.: *Einflussgrößen auf die Lebensdauer von HM-HT-Faserseilen*. In: Logistics Journal: Proceedings, Deutschland, 2019
- [Sti19] Stiny, L.: *Durch Dehnung veränderbarer Widerstand*. In: Passive elektronische Bauelemente, Springer Vieweg, Deutschland, 2019
- [Weh17] Wehr, M.: *Beitrag zur Untersuchung von hochfesten synthetischen Faserseilen unter hochdynamischer Beanspruchung*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Fördertechnik und Logistik, Deutschland, 2017

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