

Fertigung und Test eines Prototyps für die Zustandsüberwachung von Faserseilen für Krananwendungen

Manufacturing and testing of a prototype for condition monitoring of fiber ropes for crane applications

Marco Ferrari
Georg Kartnig

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung
Technische Universität Wien

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird ein Messsystem zur Zustandsüberwachung von Faserseilen entwickelt. Der Vergleich verschiedener Messmethoden führte zu einem Messsystem, das auf Dehnungsmessung durch elektrische Signallaufzeitmessung basiert. Hierbei werden elektrische Leiter und Messknoten samt Elektronik in den Seilkern eingefügt. Es wird der Aufbau des Messsystems sowie die Fertigung eines ersten Prototyps beschrieben. Erste Testmessungen mit dem Prototyp demonstrieren die Funktion der einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel und veranschaulichen die erfolgreiche Erfassung von Dehnung und Temperatur.

[Faserseil, Zustandsüberwachung, Prototyp, Messsystem]

In this research project, a measuring system for discard maturity determination of fiber ropes is developed. The comparison of various measuring methods led to a measuring system based on strain measurement by electrical signal time-of-flight measurement. Electrical conductors and measuring nodes with electronics are inserted into the rope core. The design of the measuring system and the production of a prototype are described. First test measurements with this prototype demonstrate the function of the individual components of the measuring system and their interaction and show the successful determination of strain and temperature.

[fiber rope, condition monitoring, prototype, measurement system]

1 EINLEITUNG

Die grundlegende Aufgabe dieses Projekts besteht in der Entwicklung eines Messsystems, das eine automatisierte Zustandsüberwachung des gesamten Seils ermöglicht. Zuerst wurden verschiedene Messverfahren verglichen [1]. Für das resultierende Messsystemkonzept wurden die Belastungen im Seilkern ermittelt und geeignete elektrische Leitermaterialien gewählt [2, 3, 4]. Diese Entwurfs- und Entwicklungsschritte werden hier zusammengefasst.

1.1 VERGLEICH UND AUSWAHL DES MESSPRINZIPS

Hochfeste Faserseile haben eine Vielzahl verschiedener Merkmale, die mit unterschiedlichsten Methoden erfasst werden können [5]. Einige dieser Seileigenschaften ändern sich im Laufe der Nutzungsdauer und können daher für die Erkennung der Ablegereife genutzt werden. Durch die Bewertung mehrerer Eigenschaften hinsichtlich ihrer Eignung zur Erkennung der Ablegereife wurde ein Messsystem entworfen, das die lokale Dehnung der Seilabschnitte misst und die Temperatur im Seil überwacht.

Die technischen und wirtschaftlichen Wertigkeiten einiger Messverfahren sind in Abbildung 1 dargestellt. Die weiterverfolgte Variante ist die Kombination B+C+D mit der höchsten ermittelten technischen Wertigkeit. [1]

- A: Infrarotmessung → Seilaußentemperatur [6]
- B: elektr. leitfähige Fasern → elektr. Widerstand/Leiterschädigung [7]
- C: elektr. leitfähige Fasern → Signallaufzeit/Dehnung [7]
- D: Sensoren im Seil → Temperatur, ... [8]
- E: optisch leitfähige Fasern → Signallaufzeit/Dehnung, Temperatur [9, 10]
- F: Mikroskopie → Faserbrüche, Strukturänderungen, Verschmutzungen [11]
- B+C+D: Kombination elektr. leitfähige Fasern mit im Seil integrierten Sensoren → Messung von Signallaufzeit/Dehnung, elektrischer Widerstand, Temperatur

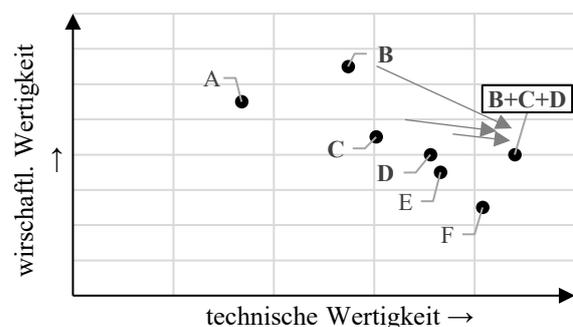


Abbildung 1. Technische und wirtschaftliche Wertigkeit [1]

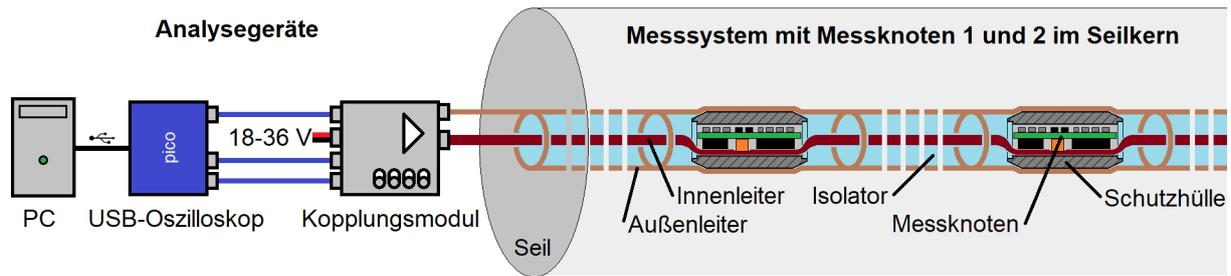


Abbildung 2. Übersicht über die mit dem Seil anfang verbundenen Analysegeräte und das elektrische Messsystem im Seilinneren

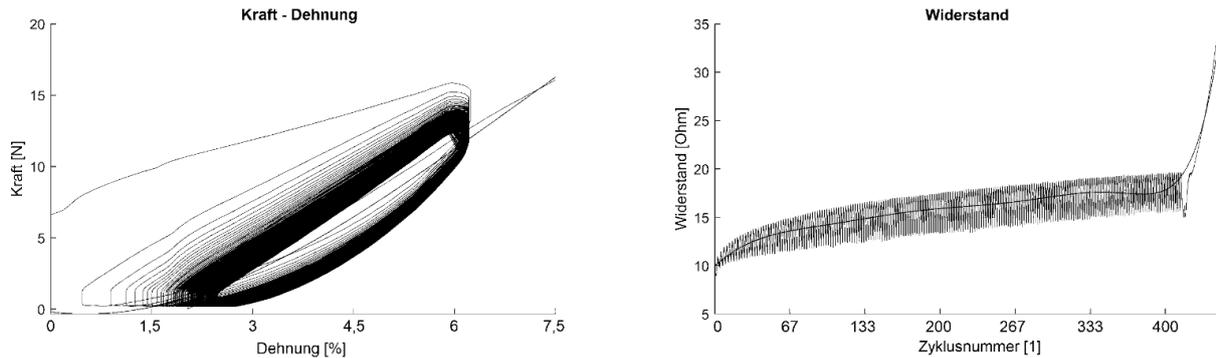


Abbildung 3. 400 Zyklen mit 5 % Dehnung für Fasermaterial mit leitfähigen Partikeln (Shieldex® 235/36 HCB x6): ausreichend hohe Dehnbarkeit, jedoch (degressiver) Anstieg des elektrischen Widerstands mit jedem Zyklus [3]

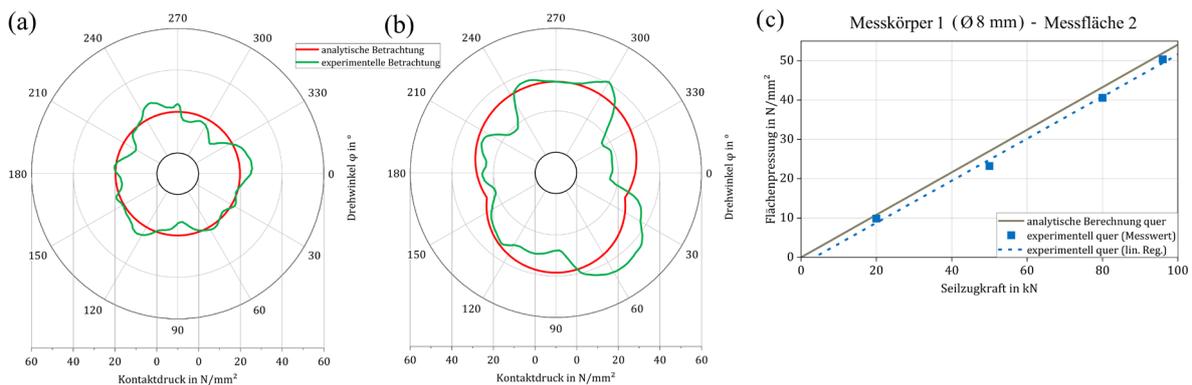


Abbildung 4. Vergleich der Ergebnisse aus analytischer Berechnung und Messungen mit Druckmessfolien: Druckverteilung am Umfang im geraden Seil (a), im gekrümmten Seil (b) und mittlerer Druck in Abhängigkeit von der Seilzugkraft (c) [4]

1.2 BESCHREIBUNG DES MESSPRINZIPS

Die für die weitere Entwicklung gewählte Kombination aus verschiedenen Messverfahren (Abbildung 1, B+C+D) zeichnet sich durch die Integration von mit elektrischen Leitern verbundener Elektronik in den Seilkernen aus. Abbildung 2 illustriert den Aufbau des Messsystems. Die im Seil in regelmäßigen Abständen positionierten Messknoten enthalten elektronische Bauteile, die eine Vermessung der einzelnen Seilabschnitte ermöglichen. Die eigentlichen Messungen erfolgen mithilfe der Analysegeräte, die mit den Leitern verbunden sind. Die Ermittlung der Signallaufzeit vom Kopplungsgerät zum ausgewählten Messknoten ermöglicht die Berechnung der Seillänge und der lokalen Dehnung, die als Kriterium für den Verschleiß dient. Änderungen des ohmschen Widerstands der Leiter können beobachtet werden. Die Temperatur des Seils wird in den Messknoten überwacht. [1]

1.3 VERGLEICH ELEKTRISCHER LEITERMATERIALIEN

Die für die Anwendung im Seil geforderten Merkmale der elektrischen Leiter sind folgende:

- elastische, reversible Dehnung entspricht oder übertrifft das Dehnungsverhalten des Faserseils
- möglichst hohe elektrische Leitfähigkeit

Diese Merkmale wurden für verschiedene Materialproben (metallische Leiter, Fasermaterialien mit leitfähigen Partikeln und leitfähige Elastomer-Extrudate) in Zyklusversuchen ermittelt. Shieldex® 235/36 HCB x6, ein mit Silberpartikeln beschichtetes Fasermaterial, erfüllt mit einer Bruchdehnung von 28 %, einem ohmschen Widerstand von ca. 10 Ohm/m und einem elastischen Dehnungsvermögen von 5 % die Anforderungen am besten. Abbildung 3 zeigt einen der Zyklusversuche mit diesem Material. [3]

1.4 ERMITTLUNG DER BELASTUNGEN IM SEILKERN

Auf den Seilkern wirken sowohl bei reiner Zugbelastung als auch beim Lauf über Seilrollen hohe Druckbelastungen, denen das Messsystem standhalten muss. Durch die Vereinfachung des Seilaufbaus auf einige Faserbündel konnte eine analytische Näherungslösung gefunden werden, die von der Seilzugkraft und dem Seildurchmesser, der Schlaglänge und vom Krümmungsradius des Seils abhängt. Zur Validierung wurden Versuche mit Druckmessfolien im Seilkern durchgeführt. Die analytisch berechneten und die gemessenen Flächenpressungen am Umfang des Seilkerns (\varnothing 8 mm, Seilaußendurchmesser 22 mm) sind in Abbildung 4 (a) für das rein zugbeanspruchte Seil und in (b) für das Seil auf der Seilrolle dargestellt (Seilkraft 20 kN). Die Faserbündel des realen Seils führen zu einer ungleichmäßigeren Druckverteilung als bei der vereinfachten analytischen Betrachtung. Die gemittelte Flächenpressung bei steigenden Seilzugkräften wird in (c) verglichen und zeigt eine gute Übereinstimmung der beiden Ansätze.

Eine zylinderförmige Schutzhülle schützt die Messknoten-Elektronik vor diesen mechanischen Belastungen. Abhängig vom Seil sollen Edelstahl-Röhrchen mit 2,5 mm Innen- und 4 bis 6 mm Außendurchmesser eingesetzt werden. Die Haltbarkeit muss experimentell für verschiedene Seilarten und -durchmesser nachgewiesen werden. [4]

2 ENTWICKLUNG DER MESSKNOTEN

2.1 KOAXIALE KONSTRUKTION

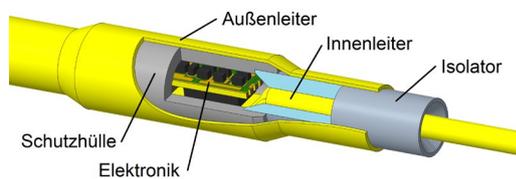


Abbildung 5. Messknoten mit koaxialem Aufbau der Leiter

Die bisherigen Darstellungen des Messsystems in früheren Veröffentlichungen zeigten mehrere parallel nebeneinander verlaufende elektrische Leiter. Durch die Reduzierung von ursprünglich sechs auf zwei Leiter und die Verwendung einer elektrisch leitfähigen Schutzhülle wurde eine koaxiale Konstruktion des Messsystems ermöglicht (Abbildung 5). Diese bietet einige Vorteile gegenüber parallel verlaufenden Leitern im Messsystem:

- größere Leiterquerschnitte sind möglich
- einfachere Isolierung der Leiter gegeneinander
- ein schrittweiser Zusammenbau wird durch den schichtweisen Aufbau erleichtert
- ein Vertauschen der Leiter beim Anschließen an die Messknotenplatine ist nicht möglich
- der begrenzte Hohlraum-Querschnitts in der Schutzhülle kann optimal genutzt werden

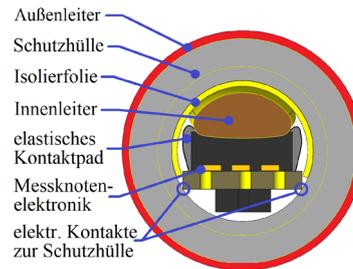


Abbildung 6. Querschnitt eines Messknoten

Abbildung 6 zeigt den Querschnitt eines Messknoten. Der Innenleiter verläuft durch die Schutzhülle direkt über die Messelektronik und ist mit dieser durch ein elastisches Kontaktpad elektrisch verbunden. Dieses Kontaktpad übt eine kleine Kraft auf den Innenleiter aus und drückt gleichzeitig die kupferbeschichteten Kanten der Platinenunterseite gegen die gegenüberliegende Seite der Schutzhülle. Mit der leitfähigen Schutzhülle wird dadurch der elektrische Kontakt zum Außenleiter hergestellt. In den Bereichen zwischen den Messknoten sorgt eine elastische Isolierschicht um den Innenleiter für einen gleichmäßigen Durchmesser des Messsystems, wie in Abbildung 5 und Abbildung 11 ersichtlich ist. Der Außenleiter wird abschließend um das Messsystem gewebt, eventuell in Kombination mit nichtleitenden Fäden. Dabei werden die Einzelteile fixiert und es entsteht eine stabile Einheit.

2.2 ELEKTRISCHER AUFBAU DER MESSKNOTEN

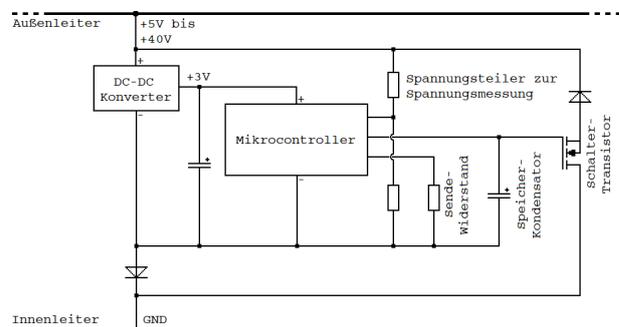


Abbildung 7. Elektrische Schaltung eines Messknoten, verbunden mit Außen- und Innenleiter des Messsystems

Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau der Messknotenelektronik. Während des Betriebs der Messknoten dient der Innenleiter als Masseleitung, auf dem Außenleiter wird die Versorgungsspannung aufgebracht. Die Spannung fällt durch den Widerstand der elektrischen Leiter mit zunehmender Seillänge ab, weshalb ein großer Spannungsbereich (5 V bis 40 V) abgedeckt werden muss. Ein Spannungswandler stellt zusammen mit einem Stützkondensator eine stabile Spannungsversorgung des Mikrocontrollers sicher. Für die Datenübertragung vom Analysegerät zum Messknoten misst der Mikrocontroller die Versorgungsspannung über einen Spannungsteiler und demoduliert die gesendeten Informationen. Die Temperatur wird intern im Mikrocontroller erfasst. Die modulierte Datenübertragung an das Analysegerät erfolgt durch periodisches Bestromen eines Sendewiderstands.

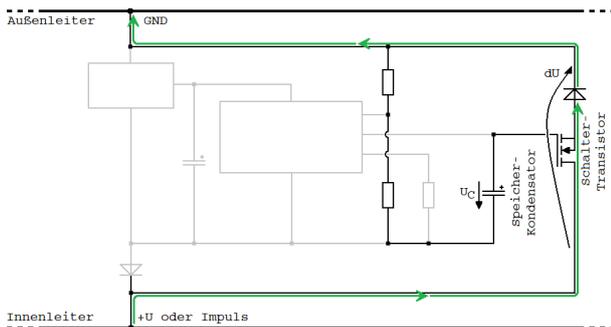


Abbildung 8. Stromfluss durch Messknoten vom Innenleiter zum Außenleiter bei geschlossenem Transistor (Kondensator geladen) bei Widerstands- und Laufzeitmessung

Eine entscheidende Funktion des Messknoten ist seine Schaltfunktion. Über einen Transistor können Innen- und Außenleiter elektrisch verbunden werden, wodurch die Signallaufzeitmessung vom Seilanzfang bis zum Messknoten ermöglicht wird. Diese Schaltfunktion muss ohne aktive Versorgungsspannung gewährleistet bleiben, da sie während dieser Messungen deaktiviert wird. Ein Speicherkondensator kann vom Mikrocontroller geladen oder entladen werden. Dadurch wird ein Feldeffekttransistor für einige Zeit geöffnet oder geschlossen gehalten, nachdem die Versorgungsspannung abgeschaltet wurde. Während der Laufzeit- und Widerstandsmessungen liegt der Außenleiter auf Masse und der Innenleiter erhält positive Spannungsimpulse. Ein gewählter Messknoten schließt durch das Laden des Speicherkondensators den Transistor und ermöglicht den in Abbildung 8 gezeigten Stromfluss durch den Messknoten. Diese Verbindung zwischen Innen- und Außenleiter erzeugt eine Reflexion des Spannungsimpulses beim Messknoten und ermöglicht die Laufzeitmessung. Bei der Widerstandsmessung wird bei einer positiven Spannung am Innenleiter der Strom über den Innenleiter bis zum Messknoten, durch den Messknoten und über den Außenleiter zurück zum Analysegerät gemessen.

3 FERTIGUNG UND MONTAGE DES PROTOTYPS

3.1 MESSKNOTENELEKTRONIK

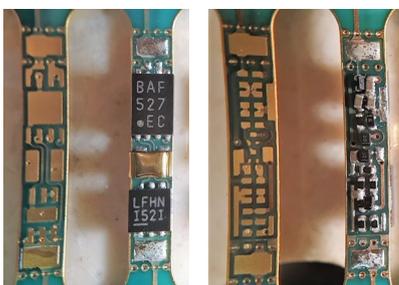


Abbildung 9. Ober- und Unterseite der Messknotenplatine, jeweils leere Platine und bestückte Platine

Für die am Steckboard entwickelte Messknotenelektronik wurde ein platzoptimiertes Platinenlayout erstellt und gefertigt. Bei der Auswahl der Komponenten wurde auf möglichst kompakte und gut verfügbare Bauteile gesetzt.

Diese Bauteile wurden auf der schmalen Platine so angeordnet, dass der runde Hohlraum der Schutzhülle optimal genutzt wird, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Die Verbindungen zu den beiden Leitern wurden mit einem Kontaktpad auf der Platinenoberseite und kupferbeschichteten Seitenkanten auf der Unterseite realisiert.

Die in Abbildung 9 gezeigten Platinen haben nach dem Herausbrechen eine Breite von 2,1 mm und einer Länge von 8,4 mm. Auf der Platinenoberseite (links) sind der Spannungswandler und der Mikrocontroller sowie das elastische Kontaktpad untergebracht, auf der Unterseite diverse Widerstände, Kondensatoren, Dioden und Transistoren. Die Bauteile wurden im ersten Schritt manuell bestückt, um verschiedene Varianten testen zu können.

Vor dem Herausbrechen der einzelnen Platinen wird der Mikrocontroller programmiert. Die folgenden Fragestellungen für die elektronischen Funktionen der Messknotenelektronik können über Prüfkontakte getestet werden:

- Wird das definierte Spannungsniveau vom Spannungswandler erreicht?
- Werden Daten vom Analysegerät empfangen?
- Werden Daten gesendet und sind diese vom Analysegerät korrekt auswertbar?
- Stellt die Messknotenelektronik eine elektrische Verbindung zwischen den beiden Leitern her und behält diesen Zustand ohne Versorgung bei?

3.2 ZUSAMMENBAU DER KOMPONENTEN

Für den ersten Prototyp des Messsystems wurde kein automatisierter Fertigungsprozess verwendet, da zuerst dessen grundlegende Funktionalität demonstriert werden muss. Im weiteren Projektverlauf soll der hier beschriebene manuelle Vorgang optimiert und automatisiert werden.



Abbildung 10. Zusammenbau: Isolierschlauch und Schutzhülle sind auf Innenleiter aufgefädelt; Messknotenplatine und Isolierfolie werden in Schutzhülle eingeschoben

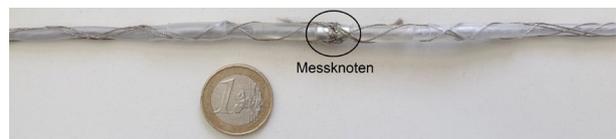


Abbildung 11. Fertiger Messsystem-Prototyp mit Messknoten und manuell umwickelten Außenleiter, Gesamtlänge 5 m

Im ersten Schritt des Zusammenbaus wird der Innenleiter hergestellt. Dazu wurden 4 Fäden Shieldex® 235/36 HCB x6 bzw. 6 Fäden Shieldex® 235/36 HCB x4 miteinander verseilt, um den vorhandenen Querschnitt in der Schutzhülle optimal zu nutzen und den elektrischen Widerstand zu reduzieren. Der passende Innenleiterdurchmesser

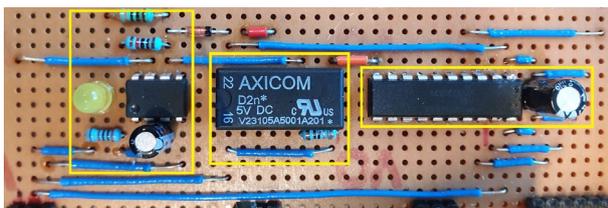
ist für die sichere Fixierung der Platine und der Isolierfolie in der Schutzhülle entscheidend. Als Isolierschicht zwischen den Messknoten dient ein Silikonschlauch mit 1,5 mm Innendurchmesser und 3,5 mm Außendurchmesser, der eine hohe Flexibilität (Biegung und Dehnung) des Messsystems gewährleistet. Der Schlauch und die Schutzhülle werden auf den Innenleiter aufgefädelt. Eine Isolierfolie wird in der Schutzhülle platziert. Beim Einschieben der Messknotenplatine wird das elastische Kontaktpad komprimiert. Die resultierende Kontaktkraft verhindert das Verrutschen und stellt den elektrischen Kontakt zwischen den Bauteilen sicher. Ein weiteres Stück Isolierschlauch wird über den Innenleiter gefädelt und schließt das offene Schutzhüllenende ab. Abschließend wird der Außenleiter um die zusammengebauten Komponenten gewickelt. Dies stellt die Verbindung der Schutzhülle zum Außenleiter her.

4 KOPPLUNGSMODUL

Das Kopplungsmodul bildet die elektrische Verbindung zwischen dem USB-Oszilloskop und dem Messsystem. Es erfüllt zwei wesentliche Funktionen: die Erzeugung einer modulierten Versorgungsspannung bei gleichzeitiger Analyse der von den Messknoten zurückgesendeten Daten sowie die Erzeugung von Spannungsimpulsen für die Laufzeitmessung. Das Oszilloskop wird über ein Relais mit den jeweils erforderlichen Signalen verbunden.



Abbildung 12. Kopplungsmodul: Energieversorgung links, Signalleitungen zum Oszilloskop und zum Messsystem rechts



Operationsverstärker Relais Impulsgenerator

Abbildung 13. Hauptkomponenten des Kopplungsmoduls

4.1 VERSTÄRKUNG DER VERSORUNGSSPANNUNG

Der Signalausgang des USB-Oszilloskops PicoScope 2207B hat einen Spannungsbereich von ± 2 V und kann softwareseitig beliebig angesteuert werden (bis 10 MHz). Da die benötigte Versorgungsspannung des Messsystems zwischen 5 V und 40 V liegt, ist eine Signalverstärkung erforderlich. Es wird der Operationsverstärker TI LM7171 in einer nicht invertierenden Verstärkerschaltung mit einer Spannungsverstärkung $V = U_a/U_e = 8$ verwendet. Dadurch

wird eine Versorgungsspannung mit modulierten Informationen für die Messknoten bis 16 V erreicht. Versorgungsspannungen bis 40 V werden erst bei deutlich längeren Messsystemen benötigt (ungefähr ab 100 m aufwärts).

4.2 IMPULSGENERATOR FÜR LAUFZEITMESSUNG

Die Signallaufzeitmessung erfordert einen kurzen elektrischen Impuls. Die Impulsdauer muss deutlich kürzer sein als die minimal erwarteten Signallaufzeiten. Unter Berücksichtigung der Signalausbreitungsgeschwindigkeit mit einem Verkürzungsfaktor v_p von 0,66 gegenüber der Lichtgeschwindigkeit und einem Abstand von 3 m zum ersten Messknoten ergibt sich eine Laufzeit von:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot 3 \text{ m}}{0,66 \cdot c} = 30,3 \text{ ns}$$

Die reflektierte Impulsantwort sollte somit nach etwa 30 ns auftreten. Die Zielgröße für die Impulsdauer beträgt daher ungefähr zehn Nanosekunden. Der Signalgenerator des verwendeten USB-Oszilloskops (PicoScope 2207B) ist für diese Anforderung um Größenordnungen zu langsam.

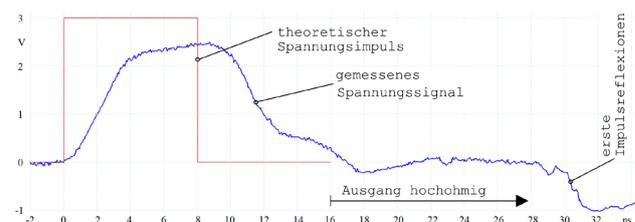


Abbildung 14. Spannungsimpuls des Mikrocontrollers mit invertierter Impulsreflexion nach 30 ns (entspricht ca. 3 m)

Für die Erzeugung des Impulses wird ein Mikrocontroller PIC18F16Q41 eingesetzt, der bei der Taktfrequenz von 64 MHz einen Impuls mit etwa acht Nanosekunden Dauer generieren kann. Ein Vorteil bei der Verwendung des Mikrocontrollers besteht darin, dass der Ausgang unmittelbar nach dem Impuls hochohmig geschaltet werden kann, wodurch die Reflexionen des Impulses deutlich besser messbar sind. Abbildung 14 zeigt den generierten Impuls sowie den weiteren Spannungsverlauf. Die Anstiegszeit beträgt etwa drei bis vier Nanosekunden, nach acht Nanosekunden kehrt der Mikrocontroller-Ausgang wieder auf das niedrige Spannungsniveau zurück. 16 Nanosekunden nach Impulsbeginn wird der Ausgang hochohmig geschaltet. Das invertiert reflektierte Signal des drei Meter langen Testkabels ist mit ausreichend zeitlichem Abstand zum Impuls nach etwa 30 Nanosekunden erkennbar.

5 PROBLEMMESSUNGEN MIT MESSSYSTEM-PROTOTYP

Um die Eigenschaften eines Seilabschnitts zu erhalten, müssen die beiden begrenzenden Messknoten vermessen werden. Die Messwerte für den Seilabschnitt ergeben sich anschließend als Differenz der Messwerte vom Seilanfang bis zu den Messknoten (Länge/Dehnung und elektrischer

Widerstand der Leiter). Für die Probemessungen wird der Messsystem-Prototyp mit zwei Messknoten mit den Analysegeräten verbunden. Im Zustand 1 wird das Messsystem nur gerade gezogen, aber nicht merklich gedehnt. Im Zustand 2 wird eine Dehnung von etwa 7,5 % gegenüber Zustand 1 aufgebracht. Abbildung 15 stellt die mit dem Maßband ermittelten Abmessungen für beide Zustände dar.

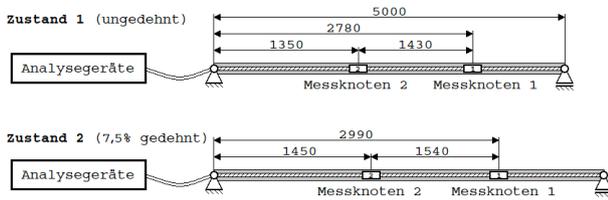


Abbildung 15. Versuchsaufbau des Messsystems mit zwei Messknoten, manuell vermessen im ungedehnten und gedehnten Zustand (Genauigkeit ± 5 mm)

Abbildung 16 zeigt die Benutzeroberfläche der Messsoftware, die das Testen und Optimieren verschiedener Auswertelgorithmen vereinfacht. Links oben werden die gemessenen Rohdaten des USB-Oszilloskops dargestellt, darunter die vom jeweiligen Algorithmus verarbeiteten Daten und unten der zeitliche Verlauf der ausgewerteten Messdaten. Im mittleren Bereich werden Informationen zum Programmablauf und Messergebnisse ausgegeben.



Abbildung 16. Nutzeroberfläche des Messprogramms zum Testen des Messsystem-Prototyps

Bei der Ermittlung aller Messwerte eines Messknoten werden die folgenden Schritte nacheinander in dieser Reihenfolge und in enger zeitlicher Abfolge durchgeführt:

- alle Messknoten in einen definierten Zustand versetzen (An- und Abschalten der Versorgung)
- Impulsantwort-Referenzmessung
- Messknoten versorgen und auswählen
- Daten des Messknotens empfangen
- Widerstandsmessung
- Laufzeitmessung

Nach fehlerfreiem Durchlauf sind die elektrischen Spannungen und die Temperatur am Messknoten bekannt und der ohmsche Widerstand der elektrischen Leiter zum Messknoten sowie die Signallaufzeit erfasst. Diese Schritte werden nachfolgend kurz beschrieben.

5.1 ZURÜCKSETZEN ALLER MESSKNOTEN

Um alle Messknoten in einen definierten Anfangszustand zu bringen, werden diese durch kurzes Ab- und Anschalten der Messsystem-Versorgungsspannung zurückgesetzt. Anschließend sind alle Messknoten-Schalter geöffnet (die Speicher-Kondensatoren entladen).

5.2 REFERENZMESSUNG DER IMPULSANTWORT

Der Impulsgenerator (Kapitel 4.2) wird aktiviert und die Impulsantwort aufgezeichnet. Dieses Signal zeigt die Reflexionen im Messsystem, wenn alle Messknoten-Schalter geöffnet sind. Der Referenzzustand ändert sich durch Temperatur, Dehnungszustand und Leiterschäden im Messsystem und wird bei jeder Messung erneut ermittelt.

5.3 MESSKNOTEN MIT GEWÄHLTER ID AKTIVIEREN

Zusätzlich zur wieder aktivierten Versorgungsspannung des Messsystems werden vom Analysegerät Daten mit drei definierten Frequenzen und geringer Amplitude aufmoduliert (Amplitude < 10 % der Versorgungsspannung). Die gesendeten Daten entsprechen der gewünschten Messknoten-ID. Alle Messknoten führen nach deren Neustart kontinuierlich eine Fourieranalyse der Versorgungsspannung durch und können die übertragenen Daten demodulieren. Stimmen diese mit der individuellen ID des Messknoten überein, bleibt dieser Messknoten für die folgenden Aktionen aktiv, ansonsten schaltet er sich ab.

5.4 MESSDATEN DES MESSKNOTEN AUSLESEN

Sobald der gewählte Messknoten für weitere Aktionen aktiviert wurde, beginnt er kontinuierlich seine Messdaten an das Analysegerät zu senden. Dafür wird der Sendewiderstand periodisch bestromt. Das Analysegerät kann diese geringfügigen Stromschwankungen erkennen und die Daten demodulieren. Der primär relevante Messwert, der auf diesem Weg übermittelt wird, ist die Temperatur des Messknotens. Der aktive Messknoten lädt während der Datenübertragung seinen Speicherkondensator. Dieser hält anschließend den Transistor-Schalter für die folgende Widerstands- und Laufzeitmessung geschlossen.

5.5 WIDERSTANDSMESSUNG

Der ohmsche Widerstand in den elektrischen Leitern zum aktiven Messknoten und zurück zum Analysegerät wird durch Messung des Stroms beim Anlegen einer kleinen positiven Spannung am Innenleiter ermittelt. Dabei muss der Spannungsabfall dU im Transistor und in der Diode des Messknotens beachtet werden, der im Strompfad in Abbildung 8 dargestellt ist. Mit mehreren gemessenen Strom-Spannungspaaren (mindestens zwei) und linearer Regression dieser Messpunkte können sowohl der Spannungsabfall im Messknoten als auch der ohmsche Widerstand der Leiter ermittelt werden. Dieser Schritt wird im Messprogramm grafisch dargestellt (Abbildung 17).

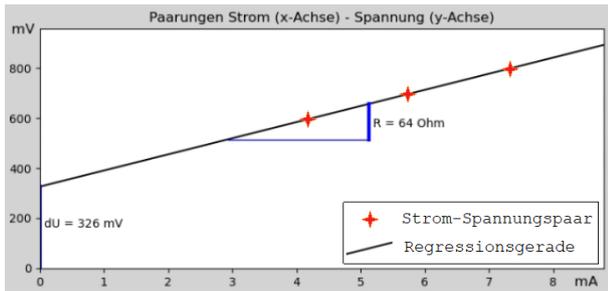


Abbildung 17. Ermittlung des Spannungsabfalls dU im Messknoten und des ohmschen Widerstands R der Leiter (Steigung der Gerade) durch drei Strom-Spannungspaare

5.6 SIGNALLAUFZEIT FÜR LÄNGEN- UND DEHNUNGSMESSUNG

Der abschließende Schritt beim Vermessen eines Messknoten besteht in der Ermittlung seiner Entfernung vom Anfang des Messsystems. Dies erfolgt durch die Messung der Signallaufzeit. Wie bei der Referenzmessung der Impulsantwort wird der in Kapitel 4.2 beschriebene elektrische Impuls auf den Innenleiter des Messsystems aufgebracht und die Reflexionen des Impulses aufgezeichnet. Abbildung 18 zeigt in der oberen Hälfte das zuvor ermittelte Referenzsignal in Grau (alle Messknotenschalter geöffnet). In Schwarz ist das aktuelle Messsignal dargestellt, bei dem der geschlossene Schalttransistor im Messknoten 1 eine kleine Veränderung der Signalreflexion bewirkt.

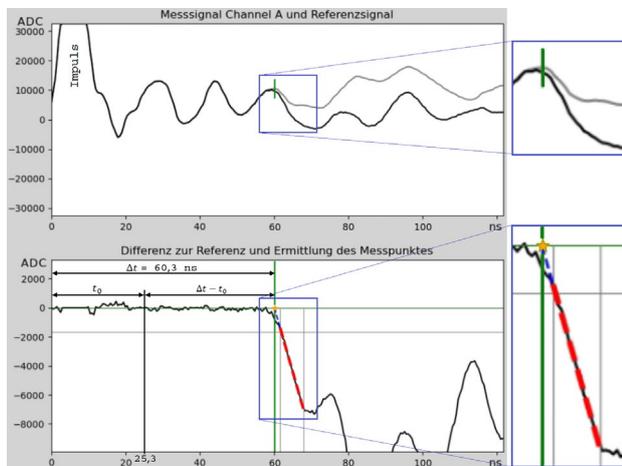


Abbildung 18. Anzeige des Messprogramms während der Laufzeitmessung Messknoten 1 im Zustand 1

Unmittelbar nach dem Impuls sind die Signale deckungsgleich, erst ab einem bestimmten Zeitpunkt weichen sie voneinander ab. Der Zeitpunkt des Abweichens entspricht der Signallaufzeit vom Analysegerät zum gewählten Messknoten und zurück. Die Darstellung der Differenz zwischen Signal und Referenzsignal (Abbildung 18 unten) macht den Abweichzeitpunkt gut sichtbar. Der Auswertalgorithmus ermittelt den Zeitpunkt mithilfe einer linearen Regression der folgenden Abweichung und einer linearen Extrapolation zurück zur Differenz 0. Die Regressionsgerade wird vom Messprogramm gestrichelt dargestellt.

Die Berechnung der gesuchten Länge $dist$ bis zur Reflexion im Messsystem aus der Signallaufzeit Δt erfordert zwei Koeffizienten: die Signalausbreitungsgeschwindigkeit im Messsystem $v_P \cdot c$ (Verkürzungsfaktor v_P und Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c) und den Zeitoffset t_0 , der die Signallaufzeit in den Verbindungskabeln vom Analysegerät bis zum Anfang des Messsystems berücksichtigt.

$$dist = \frac{(\Delta t - t_0) \cdot v_P \cdot c}{2}$$

Der von Material und Aufbau abhängige Verkürzungsfaktor (velocity of propagation v_P) wurde experimentell mit $v_P = 0,53$ festgelegt, der Offset auf $t_0 = 25,3 \text{ ns}$. Die in Abbildung 18 gezeigte Laufzeitmessung ergibt damit einen Abstand vom Seilanzfang von $dist = 2783 \text{ mm}$.

In Abbildung 19 wird die Veränderung der Signalreflexion bei kleinen Längenänderungen durch die grafische Überlagerung der Laufzeitmessung im Zustand 1 (ungedehnt) und Zustand 2 (7,5 % Dehnung) veranschaulicht. Die ermittelten Laufzeiten betragen 60,3 ns bzw. 62,9 ns, was Längen von 2783 mm bzw. 2989 mm entspricht.

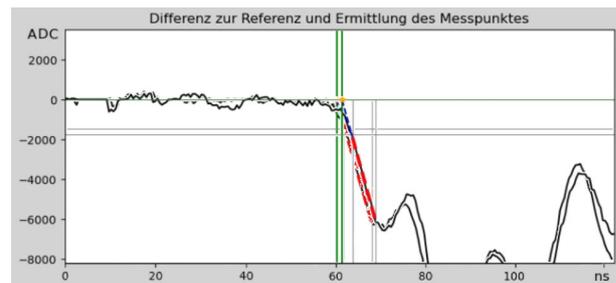


Abbildung 19. Laufzeitmessung Messknoten 1; Signale grafisch überlagert: ungedehnt 2,78 m und gedehnt 2,99 m

5.7 ERGEBNISSE FÜR DEN SEILABSCHNITT

Ergebnisvergleich			Ergebnisvergleich		
Aktuelle Messung: Messknoten 1:	Letzte Messung: Messknoten 2:	Differenz: Messknoten 1 - 2:	Aktuelle Messung: Messknoten 1:	Letzte Messung: Messknoten 2:	Differenz: Messknoten 1 - 2:
V = 6,366 V	V = 6,366 V	V = 0,254 V	V = 6,366 V	V = 6,366 V	V = 0,254 V
VDD = 3,264 V	VDD = 3,265 V	VDD = -0,021 V	VDD = 3,264 V	VDD = 3,285 V	VDD = -0,021 V
Temp = 23,384 °C	Temp = 23,973 °C	Temp = -0,479 °C	Temp = 23,384 °C	Temp = 23,973 °C	Temp = -0,479 °C
R = 65,292 Ohm	R = 42,886 Ohm	R = 22,406 Ohm	R = 64,476 Ohm	R = 42,884 Ohm	R = 21,596 Ohm
du = 326,328 mV	du = 583,572 mV	du = -257,243 mV	du = 326,334 mV	du = 581,978 mV	du = -255,636 mV
Dist. = 2,782 m	Dist. = 1,354 m	Dist. = 1,428 m	Dist. = 2,987 m	Dist. = 1,456 m	Dist. = 1,531 m
Zusammenfassung Automatikmodus			Zusammenfassung Automatikmodus		
Seilabschnitt 1 - 2:			Seilabschnitt 1 - 2:		
- Temperaturen: 23,4 °C und 23,9 °C			- Temperaturen: 23,4 °C und 23,9 °C		
- Abschnittslaenge: 1,428 m			- Abschnittslaenge: 1,531 m		
- El. Widerstand: 22,406 Ohm			- El. Widerstand: 21,586 Ohm		

Abbildung 20. Messergebnisse des Seilabschnitts zwischen den Messknoten im ungedehnten und gedehnten Zustand

Nachdem das Messprogramm alle Messwerte von zwei benachbarten Messknoten nacheinander ermittelt hat, können die Ergebnisse für den Seilabschnitt dazwischen berechnet werden. Die Ergebnisse für die Zustände 1 und 2 sind in Abbildung 20 zusammengefasst. Die im Zustand 2 gemessene Dehnung des Messsystems zwischen den Messknoten ist $1531 \text{ mm} - 1428 \text{ mm} = 103 \text{ mm}$ oder 7,2 %. Der elektrische Widerstand der elastischen Leiter hat sich bei diesem Versuch nicht signifikant verändert.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ein erster Prototyp des Messsystems für die Ablegereifeerkennung von Faserseilen wurde erfolgreich entwickelt und gefertigt. Die Beschreibung umfasst die Herstellung der Messknotenelektronik sowie den Zusammenbau des Prototyps. Das entwickelte Kopplungsmodul erfüllt seine Aufgabe als Verbindung zwischen dem USB-Oszilloskop und dem Messsystem, indem es die Signale verstärkt und die Impulse für die Laufzeitmessung erzeugt.

Die Messsoftware ermöglicht die Kommunikation mit den Messknoten über das USB-Oszilloskop in Verbindung mit dem Kopplungsmodul und führt die vorgesehenen Messungen durch. Die einzelnen Schritte eines Messdurchlaufs wurden anhand eines Versuches gezeigt, bei dem der Prototyp in unterschiedlichen Dehnungszuständen vermessen wurde. Dabei wurden zahlreiche Funktionen und Komponenten des Messsystems, die Kommunikation der Komponenten untereinander und die Temperatur- sowie die Widerstands- und Laufzeitmessung erfolgreich getestet. Besonders bei der Laufzeitmessung wurden erhebliche Fortschritte erzielt, die auf den neuen Impulsgenerator, die Verwendung von Referenzsignalen und optimierte Auswertalgorithmen zurückzuführen sind.

Die vielversprechenden Ergebnisse bilden die Basis für die nächsten Schritte. Der Prototyp hat die grundlegende Funktionalität des Messsystems demonstriert, wenn auch nur für einen kurzen Abschnitt. Die Funktionsfähigkeit der Messknotenelektronik wurde belegt, diese soll nun in größerer Stückzahl maschinell hergestellt werden. Dadurch wird der Bau eines deutlich längeren Messsystems mit einer Vielzahl von Messknoten ermöglicht, mit dem umfangreichere Versuche durchgeführt werden sollen.

Die darauffolgende Herausforderung wird die Integration des Messsystems in ein Faserseil sein, wo die mechanische Belastbarkeit der Komponenten als neues Kriterium dazukommt. Können die weiteren Hürden gemeistert werden, wird angestrebt, diese Form der Zustandsüberwachung für Faserseile durch weitere Experimente, Anpassungen und Optimierungen weiterzuentwickeln und letztendlich eine einsatzfähige Lösung für industrielle Anwendungen zu erreichen.

LITERATUR

- [1] M. Ferrari und G. Kartnig, Entwicklung einer multi-faktoriellen Messmethode für die Zustandsüberwachung von Faserseilen für Krane. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2021
- [2] M. Ferrari und G. Kartnig, Entwicklung einer multifaktoriellen Messmethode zur Zustandsüberwachung von Faserseilen für Krane – Belastungen im Seil und Wahl des Leitermaterials. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2022
- [3] R. Wieland, Auswahl und Vergleich verschiedener Draht- und Fasermaterialien anhand elektrischer und mechanischer Eigenschaften. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2022
- [4] G. Emathing, Belastungen auf einen festen Körper im Inneren eines Faserseils: Analytische, numerische und experimentelle Untersuchungen [Unveröffentlichte Diplomarbeit]. Technische Universität Wien, 2022
- [5] E. Oland, R. Schlanbusch und S. Falconer, Condition Monitoring Technologies for Synthetic Fiber Ropes - a Review. International Journal of Prognostics and Health Management 8(2), 2017
- [6] E. Bossolini, O. W. Nielsen, E. Oland, M. P. Sørensen und C. Veje, Thermal properties of Fiber ropes. Paper presented at ESGI, Denmark, 2016
- [7] T. Giannikopoulos, Konzepte für die Verschleißmessung von Seilen mit Sensorfäden. Dissertation, RWTH Aachen University, 2011
- [8] M. Wipfler, N. Laar, S. Jockenhövel und T. Gries, Smart RopEx: predicting the breakdown of synthetic braided ropes by integrated textile based monitoring systems. In Proceedings of the 5th Aachen-Dresden International Textile Conference, 2011
- [9] P. A. Robertson und B. P. Ludden, A fibre optic distributed sensor system for condition monitoring of synthetic ropes. In Proceedings of the IEE Colloquium on optical techniques for smart structures and structural monitoring, London, 1997
- [10] N. O'Hear, Optical Scanning Apparatus for Ropes nondestructive test monitoring system. In Oceans pp. 1335-1341 Vol.3, San Diego, 2003
- [11] A. Schmieder, T. Heinze und M. Michael, Schadensanalyse hochfester Faserseile. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2014

Dipl.-Ing. **Marco Ferrari** studierte Maschinenbau an der TU Wien und ist als Projektassistent 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 Institutsleiter am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung an der TU Wien.
Telefon: +43 1 58801 - 307 48
Email: georg.kartnig@tuwien.ac.at

Adresse: Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Leurgasse 6, 1060 Wien, Österreich