

Strahlungsfreier Röntgenblick

Hochauflösende zerstörungsfreie Prüfung von Stahlseilen

Im Rahmen eines vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsprojekts wurde ein neues Prüfgerät entwickelt, das eine hochauflösende, zerstörungsfreie Erkennung von Fehlstellen in Stahlseilen ermöglicht und damit die Grundlage für eine valide Schadensbeurteilung bietet.

Das nachfolgend näher beschriebene Projekt wurde von der Stuttgarter Rotec GmbH (ro-tec.net) gemeinsam mit der Professur für Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung (MRP) der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg durchgeführt.

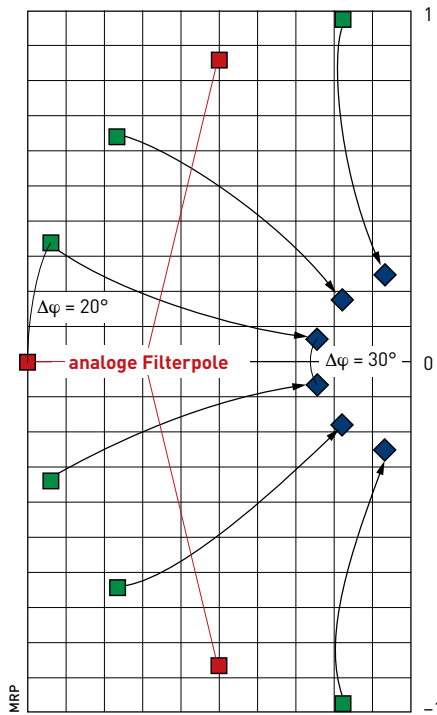
Zustandsanalyse durch Streufeldmessung

Die Magnetinduktive Seilprüfung (MRT) stellt neben der visuellen (auch kamera-unterstützten) Prüfmethode ein Standardverfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Stahlseilen dar. Sie wurde erstmalig im Jahr 1933 von Prof. Richard Woernle im jetzigen Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart erfolgreich eingesetzt und basiert auf der Messung des Streuflusses an einem magnetisch gesättigten Seilsegment. Zur Erfassung des radialen Streuflusses dient üblicherweise eine geteilte Induktionsspule, deren Spannung in Abhängigkeit vom Weg zwischen Seil und Prüfgerät aufgezeichnet wird.

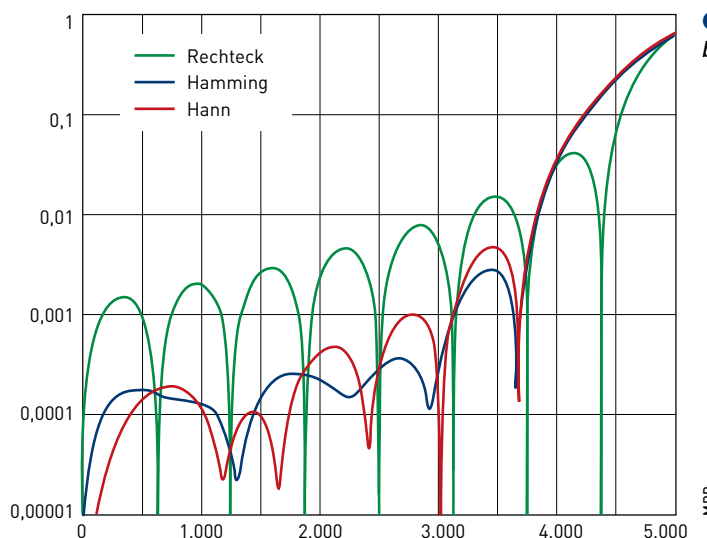
Hochauflösende (bisher nur prototypisch realisierte) Prüfgeräte messen die Verteilung des Streuflusses mit Hilfe von über den Umfang des Seils verteilten Hallsensoren, wobei je nach Sensortyp und Einbausituation die radiale oder axiale Streuflusskomponente erfasst werden kann [1, 2]. Die wesentlichen Parameter eines Seilprüfgeräts (magnetische Flussdichte im Seilsegment, Sensortypen, max. Seilgeschwindigkeit, Wegauflösung usw.) sind in der europäischen Norm EN 12927 geregelt, um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse verschiedener Prüfsysteme sicherzustellen [3].

Datenerfassung und hybride Filterung

Als Hersteller des neuen Prüfgeräts war die Rotec GmbH für folgende Anteile des Forschungsprojekts verantwortlich:



1 Filterpolstellen in der komplexen Ebene



2 Signalverzerrungen beim Resampling

- mechanische Konstruktion
- Berechnung und Simulation des Magnetfelds
- Programmierung der Mess- und Auswertumgebung
- Durchführung von Labor- und Feldversuchen.

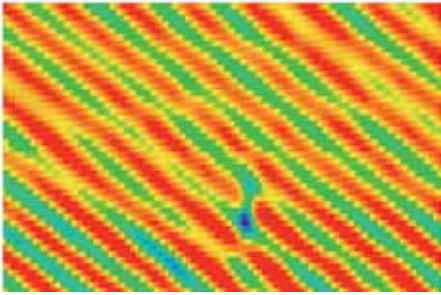
Als universitärer Projektpartner übernahm das MRP die folgenden Arbeitspakete:

- Entwicklung einer Echtzeitumgebung
- Entwicklung eines Filter- und Abtastumwandlungskonzepts
- elektronische Konstruktion
- Entwicklung von Algorithmen zur Datenanalyse.

Aus Erfahrungen mit klassischen Seilprüfgeräten und einer Analyse der Produkteigenschaften von handelsüblichen (auch hochwertigen) Inkrementalgebern konnte abgeleitet werden, dass das gängige Prinzip der durch ein Messrad mechanisch getriggerten, wegabhängigen Signalabtastung weder äquidistante noch geschwindigkeitsunabhängige Sensordaten ermöglicht. Um dennoch reproduzierbare Messdaten im Wegbereich erzeugen zu können, wurde ein vollständig neues Abtastkonzept mit einer Entkopplung der Signaltriggerung von der mechanischen Wegerfassung entwickelt.

Die Abtastung wird dabei erstmalig zeitbasiert realisiert und gestattet damit eine Nyquist-konforme (Anti-Aliasing-) Filterung der Sensorsignale durch ein (üblicherweise ebenfalls zeitbasiertes) analoges Filter. Um bei der maximal vorgesehenen Prüfgeschwin-

digkeit von 5 m/s eine Auflösung von 0,5 mm je Messsignal zu erhalten, wurde eine quarzgesteuerte Abtastfrequenz von 10 kHz gewählt. Die resultierende Wellenzahl als Äquivalent zur Frequenz im Wegbereich beträgt somit 2000 1/m. Die Grenzfrequenz des analogen Filters wurde dann, basierend auf der maxi-



ROTEC

3 Heatmap der Magnetfeldsensoren

malen Wellenzahl des Durchlassbereichs für Signale aus Fehlstellen im Seil von 400 1/m, mit 2 kHz festgelegt und eine Charakteristik mit maximal flachem Frequenzgang gewählt (Butterworth-Potenzfilter).

Da die Pole von Butterworth-Filtern auf dem Einheitskreis in der komplexen Ebene einen Abstand von $180^\circ/\text{Filterordnung}$ haben und bei ungerader Ordnung ein reeller Pol bei -1 existiert, sind die Polstellen eines Filters 3. Ordnung auch in einem Filter 9. Ordnung enthalten. Deshalb kann die Übertragungsfunktion des Analogfilters (Bild 1, rot) durch einen digitalen IIR-Filter (Bild 1, grün) zu einem Butterworth-Filter 9. Ordnung mit einer resultierenden Gesamtgrenzfrequenz von 2 kHz ergänzt werden.

Wenn die Prüfgeschwindigkeit abnimmt, muss die Grenzfrequenz des Gesamtfilters proportional angepasst werden, wobei die Pole des Analogfilters (wie auch die Grenzwellenzahl) unverändert bleiben. Die Charakteristik des neu beschriebenen und mathematisch allgemeingültig formulierten Gesamtfiltertyps stellt dann einen Potenzfilter mit (mehrfacher) Polvorgabe dar. Bei weiter abnehmender Geschwindigkeit geht das Verhalten des neuen Filtertyps wieder in einen Butterworth-Filter über, dessen Ordnung sich aus der Potenz des Gesamtfilters abzüglich der festen Polstellen (für das gewählte Beispiel zu 6) ergibt (Bild 1, blau). Um eine äquidistante Signaltriggerung sicherzustellen, werden die decodierten Inkrementalgeber-signale mit einem phasenlinearen Filter geglättet. Da eine adaptive FIR-Filterstruktur für eine Echtzeitanwendung wegen der stark variierenden Koeffizientenanzahl nicht geeignet ist, kommt ein zweistufiges IIR-Filter mit Bessel-Charakteristik und geschwindigkeitsabhängiger Gruppenlaufzeit zum Einsatz.

Die Abstummwandlung vom Zeit- in den Wegbereich erfolgt als a priori gelöste Fourier-Interpolation, wobei in Abhängigkeit von der eingesetzten Fensterfunktion bereits mit 16 Stützpunkten eine extrem verzerrungsarme Rekonstruktion der Messsignale im Durchlassband bis 2 kHz erzielt werden kann (Bild 2).

Laborversuche und Feldeinsatz

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Prüfgeräts wurden zur Validierung und Kalibrierung unterschiedliche Messungen an Stahlseilen mit bekannten Schadensbildern (z.B. innere und äußere Drahtbrüche, Kerben, Korrosion) im Laborversuch durchgeführt.

Je nach Seildurchmesser, Seilkonstruktion und Schadensart ergeben sich spezifische Muster in den Sensordaten, deren Auswertung sowohl rotatorisch (über den Umfang des Seils) als auch translatorisch (über den Verfahrweg) vorgenommen wird. Im Bild 3 sind die auf eine Ebene abgewickelten Messdaten der Hallsensoren dargestellt, wobei die translatorische Bewegung in horizontaler Richtung aufgetragen ist.

Anschließend wurde das Gesamtsystem in einem EMV-Labor einer Emissions- und Immisionsprüfung unterzogen, um eine Beeinflussung oder gar Schädigung des Geräts durch Ladungsspitzen ausschließen zu können, die im Feldeinsatz durch Potentialunterschiede zwischen Prüfgerät, Seil und Anlage entstehen können.

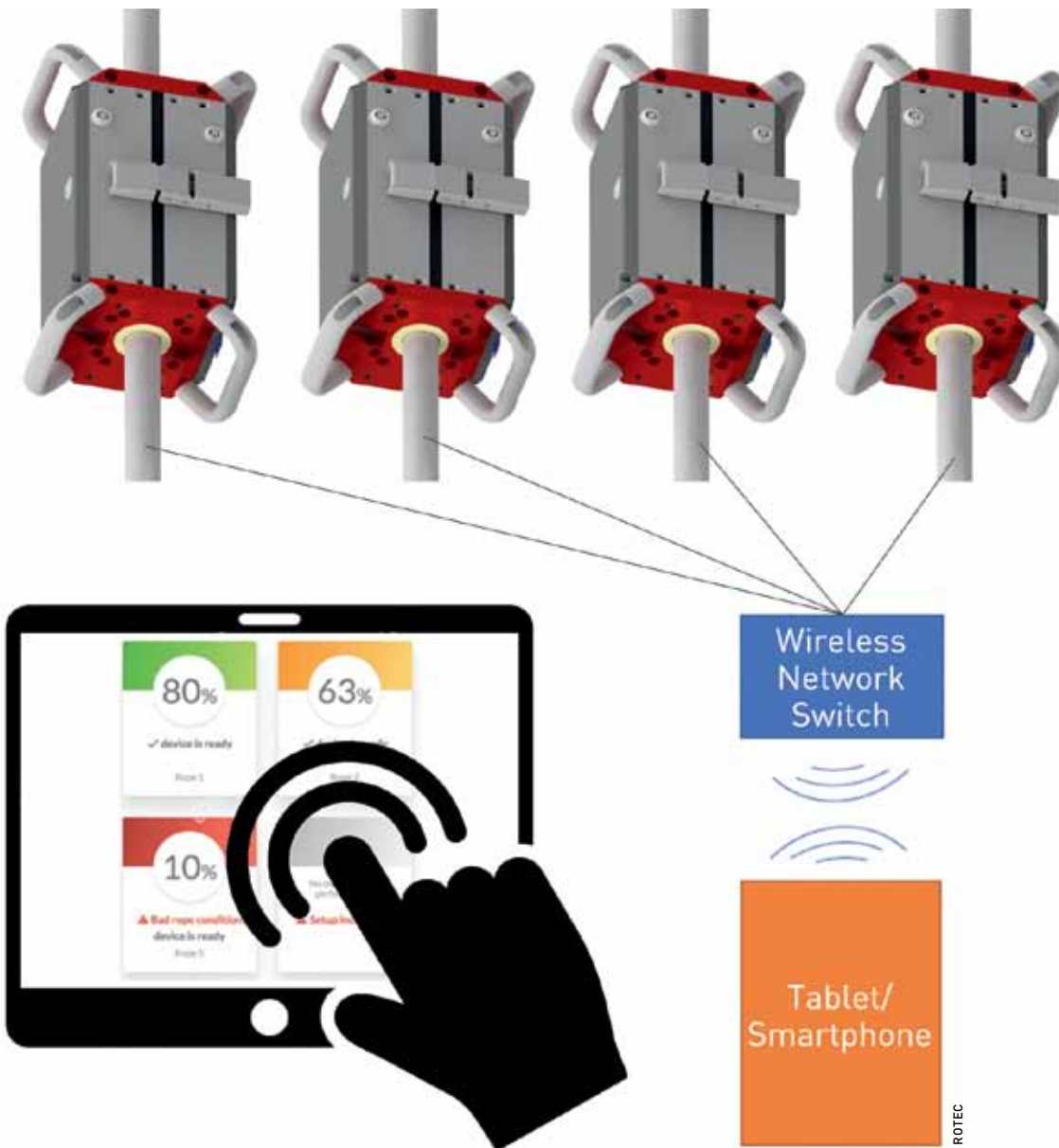
Das Prüfgerät kommt bei unterschiedlichsten Anwendungsfällen im Bereich stehender (z.B. Tragseile von Seilbahnen, Brückenseile) oder laufender Seile (z.B. Zug-, Hub-, Förderseile) für Seildurchmesser von 4 bis 140 mm zum Einsatz (Bild 4).



ROTEC

4 Beispiele für den Feldeinsatz des Magnetinduktiven Prüfgeräts R58

5 Kopplung von Prüfgeräten zum Smart Device



Außer dem Einsatz als Einzelgerät lässt sich durch eine Kopplung mehrerer Geräte die gleichzeitige, auch ständige Prüfung von parallel laufenden Seilen durchführen, wobei der gemeinsame Zugriff auf alle Messdaten über ein als Master konfiguriertes Prüfgerät realisiert wird (Bild 5).

Resümee und Ausblick

Im Rahmen eines ZIM-Kooperationsprojekts wurde ein Prüfgerät entwickelt, das eine deutlich genauere und orts aufgelöste Schadensanalyse von Stahlseilen ermöglicht und damit die Voraussetzung für eine exaktere Bestimmung der Seilnutzungsdauer liefert. Durch den Einsatz einer Echtzeitumgebung für die Steuerung des Messprozesses und einer wegunabhängigen Signalabtastung lässt sich eine Auswertung der Messgrößen im Frequenz- und Wellenzahlbereich vornehmen. Ein neuartiger Filtertyp eröffnet dabei erstmalig die Möglichkeit, analoge (invariante) und digitale Filteranteile trotz stark wechselnder Frequenzverhältnisse bei

der Abtastumwandlung zu einer gemeinsamen Übertragungsfunktion zu verknüpfen. Das Prüfgerät wurde in verschiedensten Einsatzbereichen im Labor sowie im Feld bei Prüfungsgeschwindigkeiten bis 5 m/s erfolgreich verwendet. Zur Überwachung von parallel laufenden Seilen (z. B. im Minenbetrieb) können mehrere Geräte in einer Master-Slave-Anordnung gekoppelt werden.

In einem weiterführenden Forschungsprojekt soll neben einer nochmals gesteigerten Abtastrate der Signalwandlung die gleichzeitige Erfassung des radialen und axialen Streufelds bis zum Stillstand des Prüfgeräts ermöglicht werden. Die dabei notwendige Parallelisierung der Datenerfassung und -analyse aller Sensorsignale wird im laufenden Prüfungsvorgang auf dem Endgerät stattfinden.

Das Projekt wurde im Rahmen des Innovationspreises Baden-Württemberg 2021 mit dem Sonderpreis der Mittelständischen Beteiligungsgesellschaft Baden-Württemberg ausgezeichnet und wird auf der Homepage des BMWK als Beispiel für erfolgreiche ZIM-Kooperationsprojekte präsentiert.

Literatur

- [1] Haller, A.: Erste Erfahrungen mit der hochauflösenden magnetinduktiven Seilprüfung. ZfP-Journal der DGZfP, ÖGfZP und SGZP, 1997-12.
- [2] Nussbaum, J.: Detection of broken wires using a high resolution magnetic test method., OIPEEC Proceedings 1999, Krakow (Poland), S. 129-142.
- [3] DIN EN 12927: 2019-08, Sicherheitsanforderungen an Seilbahnen für die Personenbeförderung – Seile. Ausg. 2019.



Dipl.-Ing. Christian Vorwerk,
Oberingenieur an der Professur für Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung (MRP) der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill,
Leiter der Professur für Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung (MRP) der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg