



ORGANIZZAZIONE INTERNAZIONALE TRASPORTI A FUNE
INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR DAS SEILBAHNWESEN
ORGANISATION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS A CABLES
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR TRANSPORTATION BY ROPE
ORGANISACION INTERNACIONAL DES TRANSPORTES POR CABLE

Gültige technische Empfehlungen

HEFT 3-1
Ersetzt das Heft Nr. 3
(Ausgabe 2015)

Überblick über die magnetinduktive Seilprüfung an Stahldrahtseilen



Erstellt vom September 2011 bis Februar 2015 durch den Studienausschuss II der O.I.T.A.F.
Veröffentlicht im September 2015

Diese Empfehlung ist keine verbindliche Vorgabe, sondern beinhaltet eine Hilfestellung für die Beteiligten.
Es wäre wünschenswert, dass sie in allen Ländern zur Anwendung käme. Nationale Normen oder behördliche Anordnungen gehen vor.

Inhalt

Einleitung

- 1.1 *Kontext und Anwendungsbereich*
- 1.2 *Rückblick*
- 1.3 *Abgrenzung des Anwendungsbereichs*
- 1.4 *Aufbau des Hefts*

2 *Magnetische Seilprüfung: Theoretischer Hintergrund*

- 2.1 *Messprinzip*
- 2.2 *Magnetisierung*
- 2.3 *Grundsignal des Seils (Hüllkurve oder Signatur)*
- 2.4 *Drahtbruchanzeigen*
- 2.5 *Relative Signaldichte*

3 *MRT-Geräte und Sensortechnologie*

- 3.1 *Typische Ausgestaltungen der Prüfgeräte*
- 3.2 *Feldkalibrierung / magnetische Flussdichte*
- 3.3 *Sensoren*
- 3.4 *Hochauflösende Seilprüfung*
- 3.5 *Kalibrierung des Prüfgeräts*
- 3.6 *Entfernungsmessung*

4 *Prüfungsaufbau*

- 4.1 *Voraussetzungen*
- 4.2 *Montage des MRT-Geräts*
- 4.3 *Warnhinweis für besondere Seilabschnitte und Seile*

5 *Verarbeitung der magnetischen Streufeldsignale und Analyse der Drahtbrüche*

- 5.1 *Hauptziel und Voraussetzungen*
- 5.2 *Instrumentierung und Datenerfassung*
- 5.3 *Signalaufbereitung*
- 5.4 *Signalverarbeitung und Analyse der Drahtbrüche*
- 5.5 *Grenzen der MRT-Technologie und Hauptprobleme*
- 5.6 *Fortschrittliche Signalverarbeitung*

6 *Ablegekriterien*

- 6.1 *Allgemeines*
- 6.2 *Anwendbare Ablegekriterien*
- 6.3 *Schadensentwicklung*
- 6.4 *Entwicklung der Anzahl von Drahtbrüchen*
- 6.5 *Vorgehen bei Erreichen der Ablegereife*
- 6.6 *Quellen für Ablegekriterien*

7 *Prüfberichte und Verwaltung der MRT-Daten*

- 7.1 *Prüfbericht*
- 7.2 *Verwaltung der MRT-Daten*

- 8 **Risiken und Anforderungen an das Prüfpersonal**
 - 8.1 Risiken für das Nichterkennen von Fehlstellen im Seil
 - 8.2 Risiken für Sach- oder Personenschäden während der MRT
 - 8.3 Anforderungen an das MRT-Prüfpersonal
- 9 **Schlussfolgerungen und Ausblick**
 - 9.1 Wirksam, aber nicht einfach!
 - 9.2 Probleme und die wichtigsten bekannten Grenzen?
 - 9.3 Künftige Arbeiten und Innovationen
 - 9.4 MRT in Kürze
- 10 **Literaturverzeichnis**
- 11 **Glossar**

Unter Mitarbeit von: in alphabetischer Reihenfolge

Urs Amiet (BAV, CH), Peter Baldinger (Vorsitzender) (Teufelberger Seil GmbH, Wels, AT), Rudolf Beha (LEITNER AG, IT), George Boyden (SANDIA PEAK TRAM CO, USA), Andrea Collina (POLITECNICO DI MILANO, IT), Stéphane Contardo (STRMTG, St. Martin d'Herès, FR), Bernhard Hinterndorfer (TUWIEN, A), Peter Huber VDS (Zugspitzbahn AG, Garmisch, DE), Georg Kopanakis (Konsulent, Koblenz, CH), Konstantin Kuehner (IFT STUTTGART, DE), Bruno Longatti (FATZER AG, CH), Hans Machalik (BMVIT, A), Christophe Martinet (ST-HILAIRE ROPEWAY, FR), Stefan Messmer (IWT, CH), Federico Paglia (Redaelli Tecna S.p.A., Brescia, IT), Stéphane Pernot (LETSCAN, FR), Renzo Pesciallo (SBS, Bern, CH), Josef Sutter (Doppelmayr Seilbahnen GmbH, Wolfurt, AT), Sven Winter (IFT STUTTGART, DE).

Einleitung

Allgemeines: Die ursprüngliche Fassung des OITAF-Hefts 3 – eines historischen Dokuments über die magnetinduktive Seilprüfung aus dem Jahr 1965 – musste, da sie zu veralten drohte, vollständig überarbeitet werden, um den aktuellen Stand der Technik für die zerstörungsfreie Prüfung zur Beurteilung der Sicherheit von Seilbahnseilen darzustellen.

Magnetinduktiven Seilprüfung (MRT – magnetic rope testing): Bei der zerstörungsfreien magnetischen Seilprüfung wird eine Elektro- oder

Permanentmagnet-Vorrichtung unter Nutzung des Grundsatzes des magnetischen Flusses und/oder des magnetischen Streuflusses eingesetzt. Damit können Unterbrechungen und/oder Veränderungen im metallischen Querschnitt von ferromagnetischen Drahtseilen erkannt werden.

1.1 Kontext und Zielgruppe

Dieses Heft wendet sich an Seilbahnbetreiber und -hersteller sowie Seilprüfungsunternehmen, Spleißer und ganz allgemein an alle an Seilen interessierte Kreise, wie die Eigentümer und das Betriebspersonal von Seilbahnen, Seilexperten, Behörden und Wissenschaftler.

Angenommen, es würde eine Umfrage unter Drahtseilexperten mit einfachen Fragen durchgeführt wie zum Beispiel:

- Was halten Sie von der magnetischen Seilprüfung?
- Wie gut verstehen sie die MRT?
- Inwieweit vertrauen Sie ihren Ergebnissen?

Die meisten Antworten würden wohl nahe bei den folgenden entgegengesetzten Polen liegen:

"...Die magnetische Seilprüfung funktioniert nicht, ich halte nichts davon! ..."

"...Ich habe keine Ahnung von der MRT, aber sie funktioniert wunderbar. Sie kann alle Seilschäden erkennen und alle anderen Seilprüfverfahren ersetzen!..."

Mit diesem Heft soll auch die Kluft zwischen strikter Ablehnung einerseits und blindem Glauben andererseits geschlossen werden, indem das magnetinduktive Verfahren und seine Umsetzung in der modernen MRT-Ausrüstung erläutert wird und erfahrene Seilprüfer und Forschungseinrichtungen Wissen aus ihrer täglichen Arbeitspraxis teilen.

Das Hauptziel dieser Publikation ist erreicht, wenn alle Leser nach dem Studium dieses Dokuments in der Lage sind, eine klare Position zwischen den beiden irreführenden und falschen Extremen zu beziehen.

1.2 Rückblick

Die Entwicklung von Seilprüfungsvorrichtungen scheint – wie das Drahtseil selbst – ihren Ursprung im Bergbau zu haben. Elementare elektrische Schaltkreise lieferten ein Warnsignal, wenn abstehende, gebrochene Drähte bei Berührung einer um das Seil gelegten blanken Leiterschleife zu einem Erdschluss im System führten. Während zu Beginn des 20. Jahrhunderts in England eine magnetinduktive Prüfung zur Kontrolle von Gewehrläufen

eingeführt wurde, beschrieben die Südafrikaner McCann und Colson [1] 1906 erstmals die Magnetprüfung von Drahtseilen.

Im Jahr 1931 begann Richard Woernle an der Universität Stuttgart in Deutschland mit Forschungsarbeiten im Bereich der magnetischen Seilprüfung. Das erste Patent für ein offenbares Messspulensystem, das sich für die Prüfung von Drahtseilen vor Ort eignete, wurde 1937 von Woernle und Müller [2] angemeldet (siehe Abbildung 1).

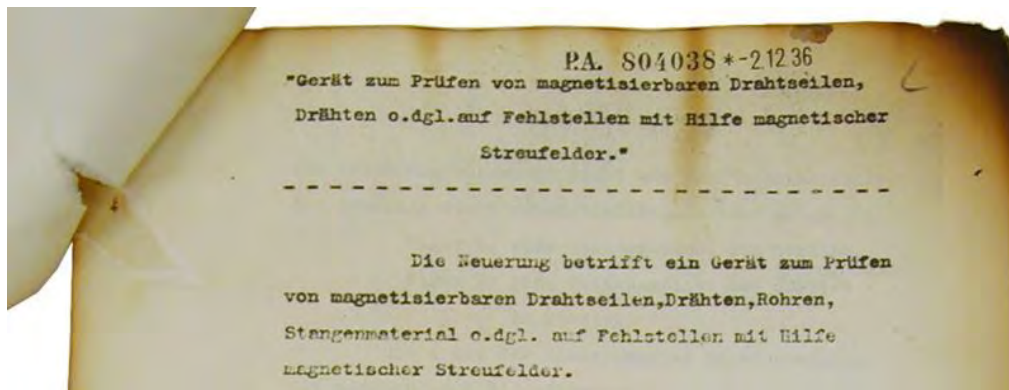


Abbildung 1: Patent von Woernle und Müller, Universität Stuttgart, Dezember 1937.

Alle frühen Systeme, wie die in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellten, wurden elektrisch – für gewöhnlich mit Gleichstrom – erregt. Die Messwerte wurden direkt auf einem X-Y-Schreiber ausgegeben.



Abbildung 2: Auf Erregung mit Gleichstrom beruhende Seilprüfung an einer alten Pendelbahn von Bleichert, Zugspitze, 1950er Jahre.



Abbildung 3: Prof. Hugo Müller bei der Überwachung eines X-Y-Schreibers, Zugspitze, 1960er Jahre.

Nach dem 2. Weltkrieg wurden einige mehr oder weniger standardisierte Prüfsysteme von den Aufsichtsbehörden mehrerer Länder für die Prüfung von Förderseilen im Bergbau wie auch von Seilen für die neue Branche der Personenseilbahnen in Betracht gezogen. Damals waren meist nur noch die bahnbrechenden Luftseilbahnen aus den 1920er und 1930er Jahren in Betrieb, während es kaum Regelungen für die Magnetprüfung von Seilbahnseilen gab.

Ein erstes Prüfgerät aus der Schweiz [3], das von SIGNUM, Wallisellen, entwickelt wurde, wurde im März 1938 zur Kontrolle des Zugseils der Dolderbahn in Zürich verwendet.

Einer der ersten Einsätze der magnetischen Seilprüfung, die für Frankreich beschrieben sind, galt der Überwachung einer Seilbahn bei einem Staudammbau. Dabei wurde ein von André Halec konstruiertes System benutzt. In Polen fanden die ersten Magnetprüfungen 1947 an den Seilbahnen von Bleichert am Kasprowy Wierch in Zakopane statt. Bemerkenswert ist, dass die Magnetprüfung 1972 für alle polnischen Personenseilbahnen vorgeschrieben wurde.

Das italienische Prüfinstitut CSIF wurde in den 1950er Jahren vom Verkehrsministerium in Rom eingerichtet. Die Aufgaben des ehemaligen CSIF wurden 1993 auf das LATIF (1971 im Trient gegründet) und dem NDT-Labor der Universität Triest (seit 1957 im Bereich der MRT tätig) aufgeteilt.

In den 1960er Jahren wurde in der Schweiz ein standardisiertes elektromagnetisches System namens Integra [3] (siehe Abbildung 4) entwickelt. Integra wurde auch als Bezugsbasis für andere magnetische Systeme in mehreren Ländern herangezogen.

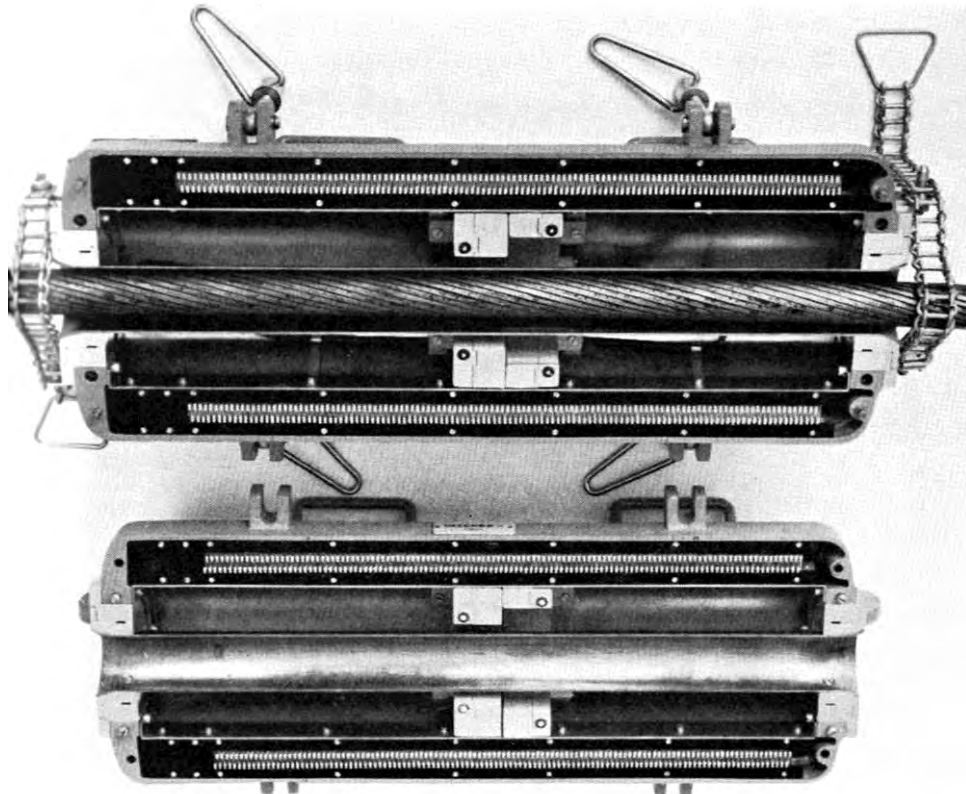


Abbildung 4: Das Gleichstromgerät Integra aus dem Jahr 1956.

In den 1970er Jahren führten Arbeiten zur Vereinfachung der Magnetprüfung zum Einsatz von Permanentmagneten, wie zum Beispiel beim Seilprüfgerät von Kündig.

Ab etwa 1990 wurden ferritische Magnete durch Seltenerd magnete ersetzt. Diese Magnete sind bei gleicher Größe und gleichem Gewicht stärker und behalten ihre Magnetkraft viel besser. So konnten sowohl Gewicht als auch Größe der Prüfgeräte erheblich verringert werden. Aufgrund der rasch gestiegenen Leistungsfähigkeit digitaler Systeme stellt die computergestützte Aufzeichnung von Messdaten heute den Stand der Technik dar. Allerdings sind weltweit noch vielfältige analoge wie auch digitale Schreiber im Einsatz.

Über die erste moderne Anwendung von Hall-Effekt-Sensoren zur Erkennung von Seilfehlern berichtete Stachurski [4] 1981 beim OIPEEC Round Table in Krakau. Diese Sensoren wurden später zur Messung des Verlusts an metallischem Seilquerschnitt (Loss of Metallic Area — LMA) bei konisch zulaufenden Abschnitten verwendet, die anhand der Signale von Spulensensoren zuverlässig erkannt werden. Für ein gründliches Verständnis der auf dem LMA basierenden Technologie der magnetischen Seilprüfung ist die Lektüre von Chaplin et al [5] und Dohm [6] sehr empfehlenswert.

Mitte der 1990er Jahre wurde am IFT der Universität Stuttgart ein hochauflösendes Messgerät konstruiert, bei dem eine große Anzahl von Hall-Sensoren kreisförmig um das Seil angeordnet sind: dieses System liefert genauere Informationen über die Lage und Tiefe von Fehlstellen innerhalb des

Seils [7]. Zur selben Zeit wurde in der Schweiz ein sehr ähnliches System von der EMPA entwickelt [8].

Da sowohl bei Luftseilbahnen als auch in anderen Anwendungsbereichen wie der Offshore-Industrie immer dickere Seile eingesetzt werden, müssen auch die Magnetsysteme stärker werden, damit sie den größeren metallischen Querschnitt abdecken können. Darüber hinaus müssen Systementwickler die Verfahren zur Verwaltung und Verarbeitung der bei Seilprüfungen erfassten Daten, einschließlich der automatischen Auswertung und Aufbereitung zur weitergehenden Fehlerdiagnose, weiter verbessern. Dadurch erhalten die Betreiber von leistungsstarken Seilbahnen, wie sie auf Flughäfen oder im städtischen Nahverkehr eingesetzt werden, immer mehr Unterstützung bei der Gewährleistung der Zuverlässigkeit ihrer Systeme.

1.3 Abgrenzung des Anwendungsbereichs

Dieses Heft bietet einen Einblick in Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung der Oberfläche oder des inneren Aufbaus von Seilen. Es stellt weder eine Betriebsanweisung noch ein normatives Dokument dar. Sein Zweck ist es, ein allgemeines Verständnis von zerstörungsfreien Seilprüfmethoden zu vermitteln und ergänzende Erklärungen zu normativen Dokumenten, Sicherheitshinweise, Arbeitsrichtlinien und Beispiele aus der Praxis zu bieten.

Im gesamten Heft wird der Begriff "Seil" für die bei Seilbahnen eingesetzten Stahldrahtseile verwendet, z. B.:

- Zugseile,
- Förderseile,
- Tragseile und
- Spannseile.

Dieses Heft sollte keinesfalls:

- als Anleitung für magnetische Seilprüfungen verwendet werden oder
- normative Vorgaben / Normen ersetzen.

Der Schwerpunkt liegt darauf, die Bedeutung und die Feinheiten der magnetischen Seilprüfung zur Beurteilung der Betriebssicherheit aufzuzeigen.

1.4 Aufbau des Hefts

Nach Behandlung der theoretischen Grundlagen der magnetischen Induktion und der damit zusammenhängenden Grundsätze der magnetischen Seilprüfung in Abschnitt 2 wird in Abschnitt 3 auf die allgemeinen Merkmale moderner MRT-Geräte und ihrer Sensorelemente eingegangen. In Abschnitt 4 wird der Aufbau von MRT-Geräten an Seilbahnseilen für die einzelnen Verwendungszwecke der Seile — als Trag-, Förder- bzw. Zugseile — eingehend beschrieben. Leitlinien für die richtige Durchführung der MRT-Prüfung werden erörtert und anhand von Beispielen veranschaulicht. Darauf folgt in den Abschnitten 5 und 6 eine Einführung in die Grundlagen der Signalverarbeitung für die Erkennung

von Seilschäden durch Auswertung der von Messspulen gelieferten Daten. Die in Normen üblicherweise angegebenen Ablegekriterien werden in Abschnitt 7 zusammen mit den ihnen zugrunde liegenden Überlegungen erklärt. Bei MRT-Prüfungen häufig auftretende Risiken werden in Abschnitt 8 besprochen. Des Weiteren werden Anforderungen an das Prüfpersonal sowie Sicherheitsempfehlungen zur Minimierung des Verletzungsrisikos aufgeführt. Abschließend werden in Abschnitt 9 Schlussfolgerungen und ein Ausblick für die magnetische Seilprüfung dargelegt.

Magnetische Seilprüfung: Theoretischer Hintergrund

Zusammenfassung: *Das Konzept der magnetischen Induktion ist vom Faraday'schen Gesetz und der Lenz'schen Regel abgeleitet, die somit die theoretischen Grundlagen der MRT liefern. Bei diesem Verfahren wird erstens das Seil mittels einer Gleichstromspule oder Permanentmagneten in Längsrichtung erregt und zweitens der magnetische Streufluss, der bei einer Lücke zwischen den benachbarten Enden eines gebrochenen Drahts entsteht, gemessen. In der Praxis erzeugt der Streufluss eine Spannung an einer Messspule. In diesem Abschnitt werden die bei Seilprüfgeräten häufig verwendeten Radial- und Axialspulenstrategien sowie die bei den unterschiedlichen Anordnungen auftretenden Drahtbruchsignale erläutert. Schließlich wird auf das Problem des Grundsignals von Seilen, das die Erkennung von Drahtbrüchen anhand der MRT-Signale erschwert, eingegangen und weiterführend der Einfluss von Verschleiß und Korrosion auf die Form des MRT-Signals beschrieben.*

1.5 Messprinzip

Ist ein Drahtseil entlang seiner Achse magnetisiert, verursachen Störungen im Seilverband, z. B. Drahtbrüche, ein Streufeld. Veränderungen der radialen oder axialen Streufeldkomponente erzeugen eine Spannung an einer Induktionsspule, die dieses sich ändernde Feld umfasst. Die resultierende Analogspannung wird elektronisch verstärkt und normalerweise vor der Ausgabe auf Papier oder der Speicherung in ein digitales Signal umgewandelt. Das Messprinzip bei der magnetischen Streufeldprüfung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Um das gesamte Seil zu umfassen, werden zwei Radialspulen benötigt, die jeweils eine Hälfte des Seils abdecken. Falls nicht anderes angegeben, beziehen

sich die nachstehenden Ausführungen ausschließlich auf die radiale Anordnung der Spulen.

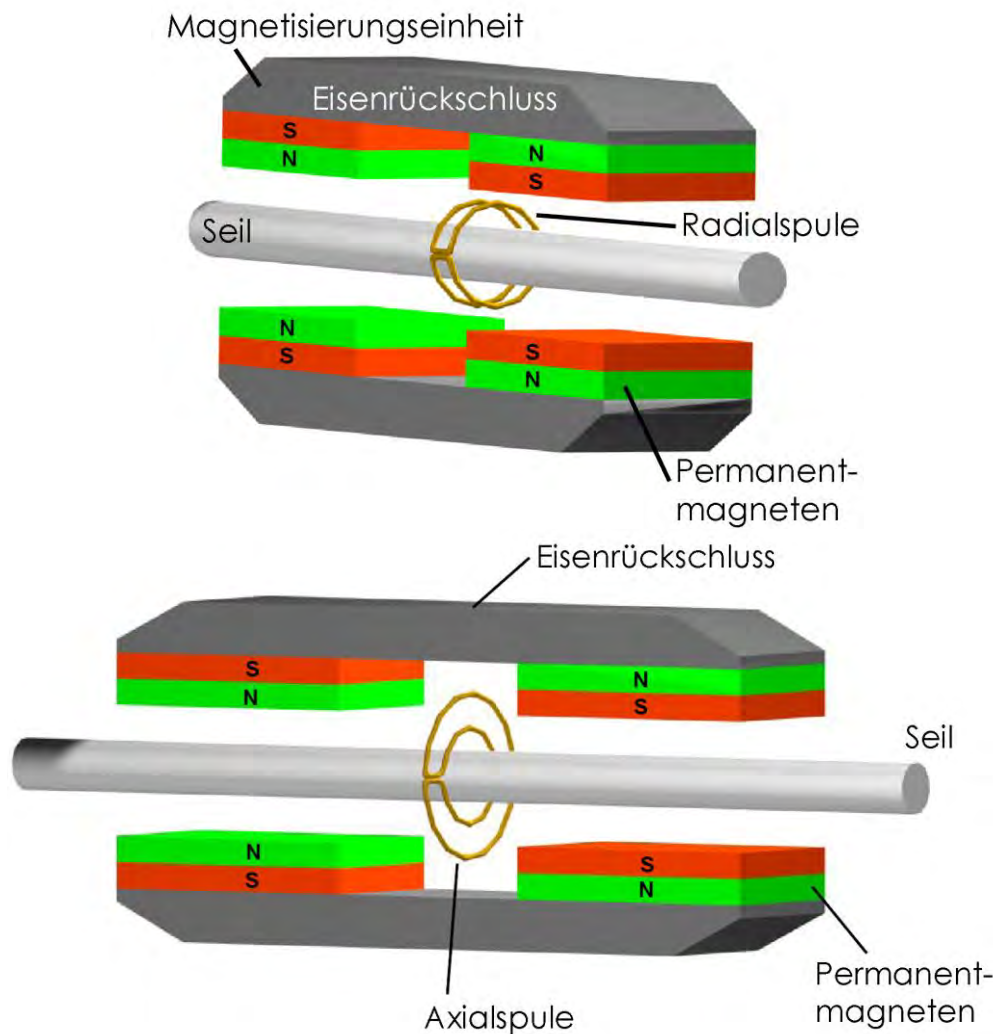


Abbildung 5: Messprinzip bei der magnetischen Streufeldprüfung:
Oben — Radialspule, unten — Axialspule.

1.6 Magnetisierung

Am Seil erzeugt das MRT-System einen Magnetkreis, der den metallischen Querschnitt des Seils bis zur Sättigung, d. h. 2,1 Tesla bei Stahldraht, aufmagnetisiert. Eine starke, homogene Magnetisierung des Seilquerschnitts im zu prüfenden Seilabschnitt ist erforderlich, um eine hohe Fehlererkennungsrate über den gesamten Seilquerschnitt zu erzielen und insbesondere Drahtbrüche im Seilinneren zuverlässig zu entdecken. Das MRT-Gerät ist magnetisch und mechanisch so zu dimensionieren, dass verschiedenartige Fehlstellen im zu prüfenden Seildurchmesserbereich optimal interpretiert werden können.

In der Regel werden Eisenrückschlüsse eingebaut, um den Magnetkreis außen parallel zur Seilachse zu schließen. Die Erregung kann mittels Permanentmagneten oder Gleichstromspulen erfolgen. Bei Seilbahnanwendungen hat sich die Erregung mit Wechselstrom nie durchgesetzt (obwohl dies jahrelang bei Förderseilen im Bergbau in Südafrika die Technik der Wahl war), da dafür niedrige Frequenzen von nur wenigen Hertz erforderlich sind. Ein Problem bei der Wechselspannungserregung liegt darin, dass die Selbstinduktion die vollständige Umkehr des Magnetfelds verlangsamt, was wiederum zu einem Skin-Effekt bei der magnetischen Eindringtiefe im Seil führt. Bei den heute gängigen Systemen sind die Magnetisierungseinheiten auf unterschiedliche Weise angeordnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über typische Konfigurationen (magnetische Teile sind schraffiert dargestellt):

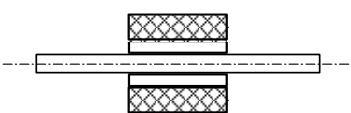
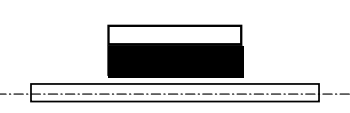
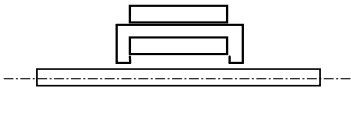

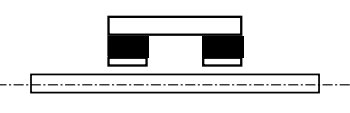
	Elektromagnet	Permanentmagnet
Hauptkreis		
Nebenschluss		
		

Tabelle 1: Anordnung von Magnetisierungseinheiten.

Abbildung 6 zeigt das Magnetfeld für einen typischen Nebenschluss mit Permanentmagneten:

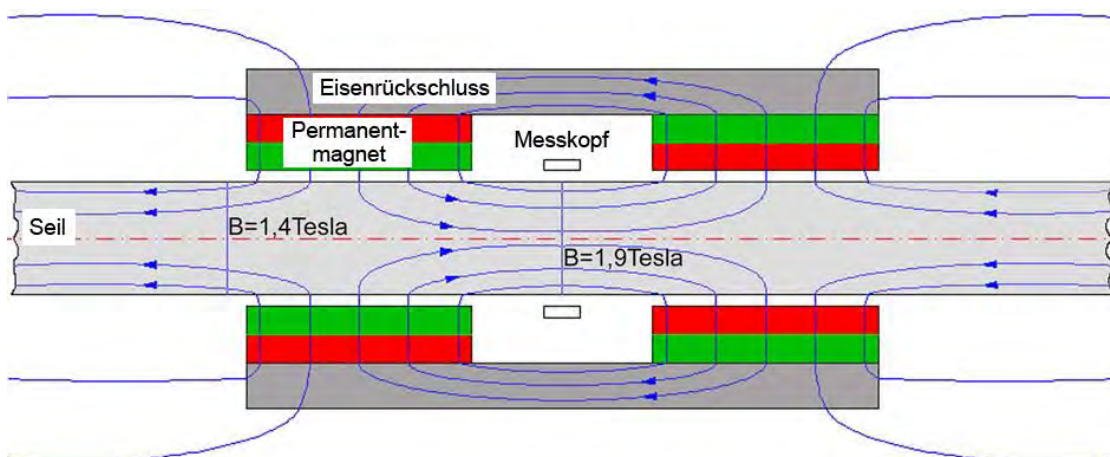


Abbildung 6: Magnetfeld eines typischen Geräts mit Permanentmagneten

1.7 Grundsignal des Seils (Hüllkurve oder Signatur)

Das MRT-Gerät magnetisiert das Seil mittels eines Magnetfelds, das im Wesentlichen parallel zur Seilachse verläuft. Die Richtung des im Seil erzeugten Magnetfelds wird weitgehend von der Einfach- oder Doppelwendel der Drähte sowie der generellen Konstruktion des Seils und des Geräts selbst beeinflusst. Ob die Drähte oder Litzen kompaktiert sind oder nicht, wirkt sich ebenfalls aus. Das Magnetfeld überbrückt daher kontinuierlich die "Drahtbarrieren" und bildet einen magnetischen Streufluss, der im Streufeld ersichtlich ist. Dieser magnetische Streufluss erzeugt das so genannte Grundsignal bzw. die Hüllkurve in der Messspule. Das "ungestörte" Streufeld (keine Drahtbrüche, keine durch Nachbardrähte eingekerbte oder abgeplattete Drähte und keine anderen Querschnittsänderungen) bildet somit den Seilverband selbst ab und entspricht im Idealfall (konstante Schlaglänge) einer periodischen Funktion. Im Wesentlichen wird das Grundsignal durch die Wendelung der Drähte und Litzen erzeugt.

Die Amplitude des Grundsignals nimmt zunächst durch das Setzen des neuen Seils ab. Danach vergrößert sich das Grundsignal mit zunehmender Lebensdauer durch Verschleiß, Einkerbungen durch Nachbardrähte, lokale Verformung (was die Permeabilität des Stahls verändert) und Korrosion. Allgemein gesagt kann das Grundsignal erheblich variieren und hängt hauptsächlich von der Seilkonstruktion, dem Produktionsprozess des Seils und von dem bei der Seilprüfung eingesetzten MRT-Gerät ab.

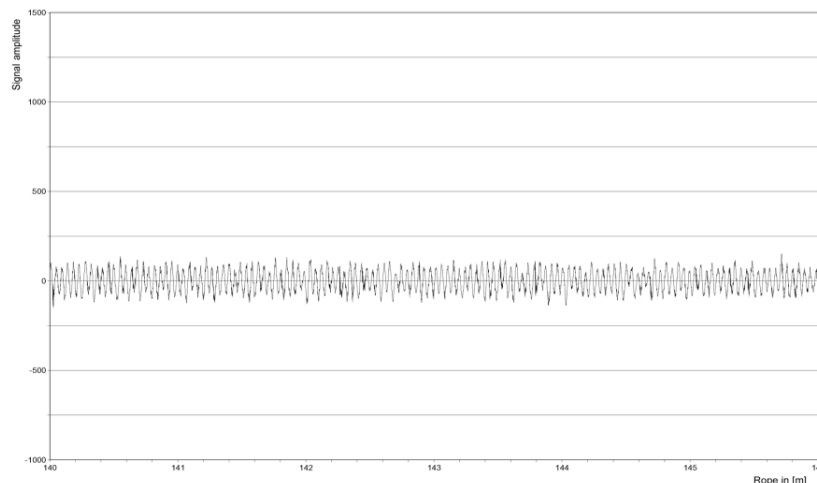


Abbildung 7: Beispiel für das Grundsignal eines neuen Litzenseils

Bei neuen Seilen ist zu beachten, dass das Grundsignal von kompaktierten Drahtseilen höher und das von verschlossenen Spiralseilen niedriger sein könnte als das Grundsignal von gängigen Rundlitzenseilen. Abbildung 7 zeigt das Grundsignal eines neuen Seils.

1.8 Drahtbruchanzeigen

Ein grundlegendes Verständnis der Beziehung zwischen einer Fehlstelle und dem gemessenen Signal liefert die Grundformel des Induktionsgesetzes:

$$U_i = -N \cdot \frac{\Delta(B \cdot A)}{\Delta t} \quad (1)$$

Die Induktionsspannung U_i in Formel (1) ist abhängig von:

- der von der Spule tatsächlich erfassten Fläche A ,
- der Anzahl der Spulenwicklungen N (eine feststehende Größe bei der Prüfung) und
- der Veränderung $\Delta B/\Delta t$ des Magnetfelds B , die von der Form des Drahtbruchs und seiner Lückenweite bestimmt wird.

Die Form des Drahtes selbst ist ein unveränderlicher Parameter. Die charakteristische Form eines Drahtbruchsignals hängt jedoch unter anderem auch mit der Konstruktion der Sensoreinheit, der eingestellten Erregung sowie der vom Prüfer gewählten relativen Geschwindigkeit zusammen. Wird die Prüfung zu langsam durchgeführt, heben sich die Drahtbruchsignale in der Messwertkurve nicht ausreichend ab. Ist hingegen die gewählte Geschwindigkeit zu hoch, können Vibrationen und eine Verschiebung des Mittelpunkts des inneren Felds zu einer Verschlechterung der Signalqualität führen.

Das Drahtbruchsignal hat eine charakteristische Form, die dem Buchstaben "w" ähnelt. Es entsteht durch Kombination der einzelnen Induktionssignale U_1 und U_2 der beiden gebrochenen Drahtenden an der Fehlstelle zum Summensignal U (siehe Abbildung 8).

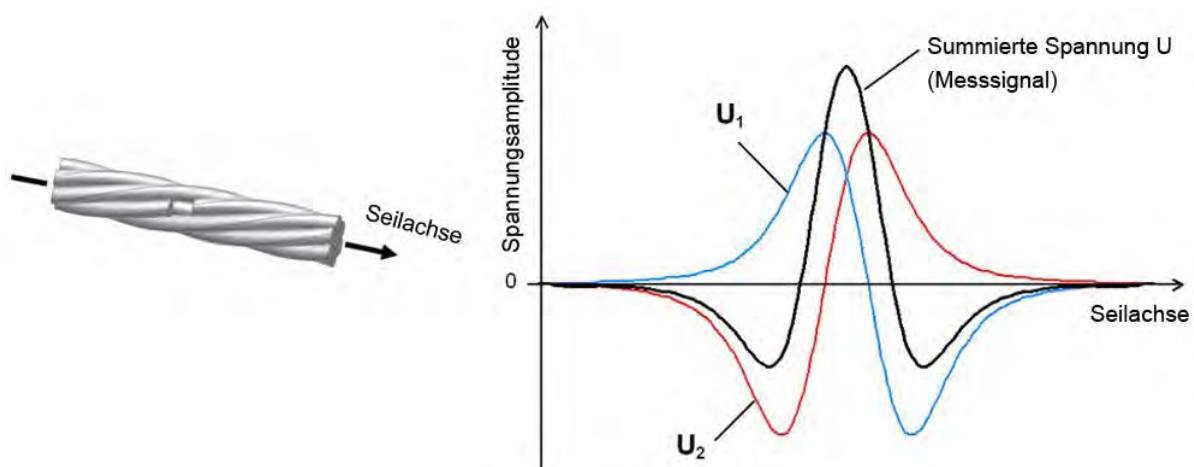
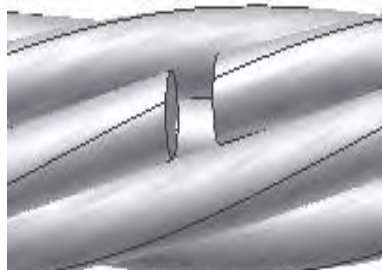
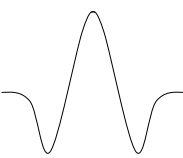

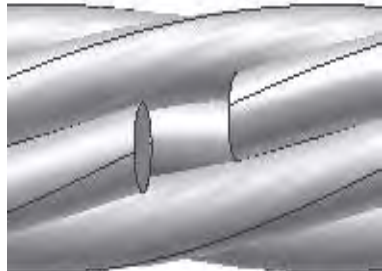
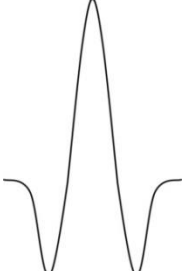



Abbildung 8: Kombination der Signale der Bruchenden zum Gesamtsignal für die Fehlstelle (der Einfachheit halber wird das Seil nur schematisch als einzelne Litze dargestellt).

Die Gestalt des w-förmigen Ausschlags variiert je nach Weite der Lücke zwischen den Bruchenden (siehe Tabelle 2). Die Signalamplitude ist bei einer kleinen Lücke gering und nimmt mit der Weite der Lücke bis zu einem Höchstwert zu. Bei noch größeren Lücken nimmt die Signalamplitude wieder ab und beginnt ihre typische Form zu verlieren. Dies erkennt man zuerst an der sich ausbildenden Delle. Je weiter die Lücke wird, desto größer wird die Delle, die sich bei sehr großen Lücken der Nulllinie asymptotisch annähert, so dass sich der ursprüngliche Ausschlag in zwei getrennte Signalamplituden aufteilt. Diese beiden Signalamplituden U_1 und U_2 (siehe Abbildung 8) entsprechen den beiden Drahtenden des Drahtbruchs, weisen aber eine entgegengesetzte Polarität auf.

Auf das Phänomen von Drahtbruchhäufungen wird weiter unten in Abschnitt 5 eingegangen. Das oben dargestellte Streufeld für einen gebrochenen Draht ist proportional zur Fläche des Drahtquerschnitts. Dementsprechend können bei einem Bruch dickere Drähte einen stärkeren Ausschlag beim Messsignal bewirken als dünnere Drähte. Abgesehen von den bereits genannten Einflussgrößen des Signals (z. B. Stärke des Magnetfelds, Lückenweite, Überlagerung von Fehlstellen und Ausmaß der Querschnittsverringering) hängt die Qualität der Messung auch von der Lage der Fehlstelle innerhalb des Seilquerschnitts (Mitte oder Außenfläche), von der Art des Schadens und der Geometrie der Prüfspule ab. Liegt bei einem gebrochenen Draht keine Lücke vor, ist die Höhe des Signals gleich Null. Durch die gewählte Magnetisierung und die Anordnung der Spulen ist sicherzustellen, dass Brüche an dünnen Drähten mit kleinen Lücken zuverlässig erkannt und aufgezeichnet werden können.

Länge der Fehlstelle	Signal einer Radialspule	Signal einer Axialspule
		
		

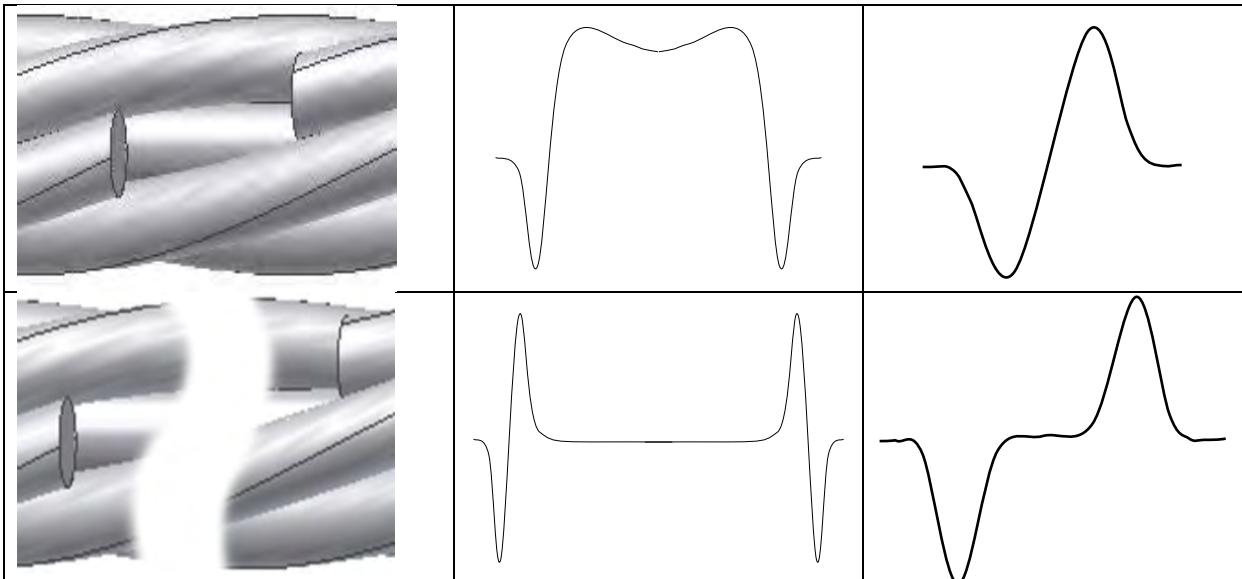


Tabelle 2: Drahtbrüche und die entsprechenden charakteristischen Streufelder bei radialen und axialen Signalen.

1.9 Relative Signaldichte

Die relative Signaldichte in bestimmten Abschnitten oder über die gesamte Länge des Seils kann in einem Diagramm dargestellt werden. Die Amplituden – positive wie auch negative – der gemessenen Spitzen werden ihrer (relativen) Anzahl über alle Messung gegenübergestellt, wodurch man eine glockenförmige Kurve erhält. Wenn ein Seil neu ist, wird das Signal durch den hohen Anteil von Spitzen mit niedriger Amplitude bestimmt, so dass die Glockenkurve einen hohen Scheitel und steil abfallende Schenkel hat. Durch Verschleiß und Korrosion wird die Glockenkurve breiter und flacher, da die Anzahl hoher Spitzen im Messsignal zunimmt (siehe Abbildung 9).

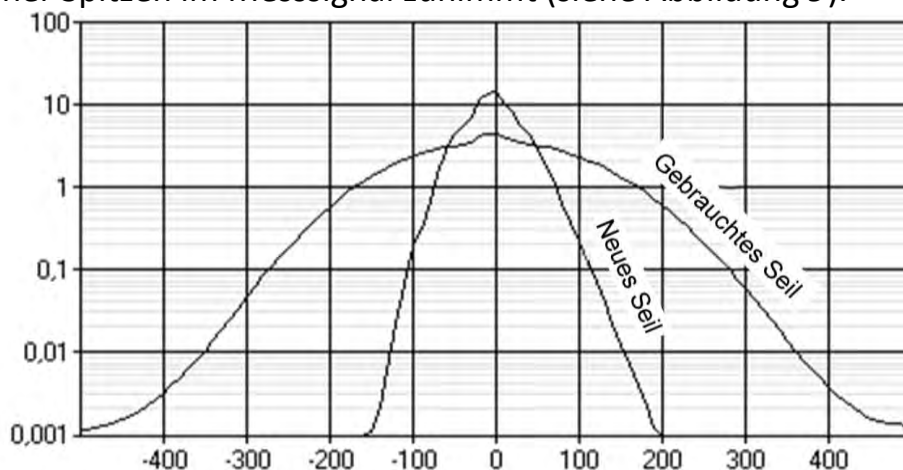


Abbildung 9: Veränderung der Glockenkurve für die relative Signaldichte aufgrund von Verschleiß und Korrosion.

Ein Sonderfall ist in Abbildung 10 dargestellt. Enthalten die Messwerte eine hohe Anzahl von Drahtbruchsignalen, gibt es eine entsprechende Anzahl von

hohen positiven Signalen, die sich von der Hüllkurve des Grundsignals abheben. Dadurch wird die Glockenkurve asymmetrisch und bildet einen kleinen "Fuß" am rechten Ende aus, der auf Drahtbrüche zurückgeht:

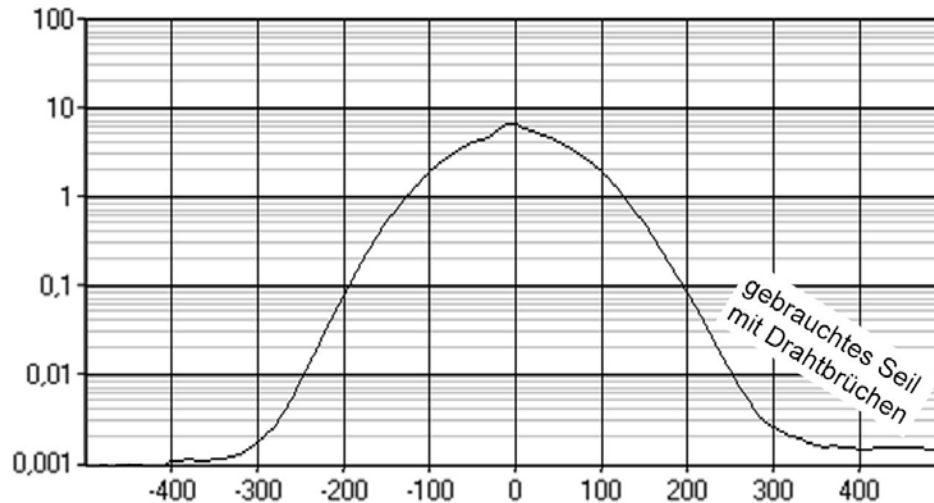


Abbildung 10: Glockenkurve mit asymmetrischem Fuß aufgrund von Drahtbrüchen.

MRT-Geräte und Sensortechnologie

Zusammenfassung: Die Konstruktion und die Merkmale der MRT-Geräte sind sehr wichtig dafür zu gewährleisten, dass das induzierte Magnetfeld den mittleren Teil des Seilquerschnitts sättigt und in der Umgebung der Messspulen ziemlich homogen ist. In diesem Abschnitt werden einige typische Ausformungen von MRT-Geräten und Messspulentechnologien beschrieben und Leitlinien für die Gestaltung wirkungsvoller MRT-Geräte angeführt. Ebenso wird auf wesentliche Konzepte der Signalkalibration für die Bewertung der Konstruktion von MRT-Geräten im Labor eingegangen. Schließlich werden für fortgeschrittene Leser die magnetinduktive Simulation und ein hochauflösendes 3D-Gerät mit einem Ring von Hall-Sensoren als zukunftssträchtige Technologie vorgestellt, die ein besseres Verständnis der Fehlerverteilung im Seil erlaubt.

1.10 Typische Ausgestaltungen der Prüfgeräte

Im Lauf der Entwicklung von MRT-Geräten wurden von unterschiedlichen Herstellern über die Jahre mehrere klassische Formen erarbeitet, die alle aus denselben Grundkomponenten bestehen:

- Hauptrahmen,

- Stäbe, Rohr oder Gehäuse zur Aufnahme der Erregerquelle für Magneten und Eisenrückschluss,
- Messköpfe,
- Zentrierelemente, wie Rollen oder Führungen,
- Anschlussbox für Spulenkanäle, optional mit Signalvorverstärker,
- Auslösemechanismus und Entfernungsmesser,
- äußere Elemente wie Griffe, Öffnungshebel, Kabelverankerungen usw.

Der Gesamtaufbau hängt davon ab, wie die Magneten selbst im System angeordnet sind, wobei der Magnetriegel häufig als modulare Komponente gestaltet ist. Weltweit gibt es zwar unterschiedliche Bauarten, doch die folgende Beschreibung beschränkt sich auf einen Überblick über die in Europa gängigen Formen des Magnetkreises.

1.10.1 U-Form (asymmetrische Erregung)

Der Hauptvorteil einer U-Form, wie sie in Abbildung 11 dargestellt ist, liegt darin, dass das System an einer Seite — meist unten — offen ist. Die magnetische Erregung ist so ausgelegt, dass der gesamte Querschnitt gesättigt wird, wobei die Magnetkraft im Verhältnis zum maximalen Seilquerschnitt, für den das Gerät vorgesehen ist, etwas überdimensioniert sein muss, weil nur an drei Seiten Magnetriegel eingebaut sind. Aufgrund dieser Form kann das System bei der Prüfung von Tragseilen Seilreiter und Stützensättel überfahren, wodurch die Ausfallzeit von Seilbahnen aufgrund von Prüfungsarbeiten auf ein Minimum beschränkt wird. Nur die untere Hälfte des Messkopfes kann weggeklappt werden. Da die Sättel von modernen Luftseilbahnen ohne Tragseilbremsen breiter sind als an herkömmlichen Seilbahnen — in manchen Fällen sind die Seile auch an der Stütze befestigt — kann eine automatisierte Abhebevorrichtung nötig sein, um das Gerät und seine empfindlichen Messköpfe vom Seil weg zu bewegen. Aufgrund des hohen Gesamtgewichts des U-förmigen Geräts bei sehr dicken verschlossenen Spiralseilen werden derartige Systeme im Allgemeinen nur bei Seilen mit einem Durchmesser von mehr als 100 mm eingesetzt.

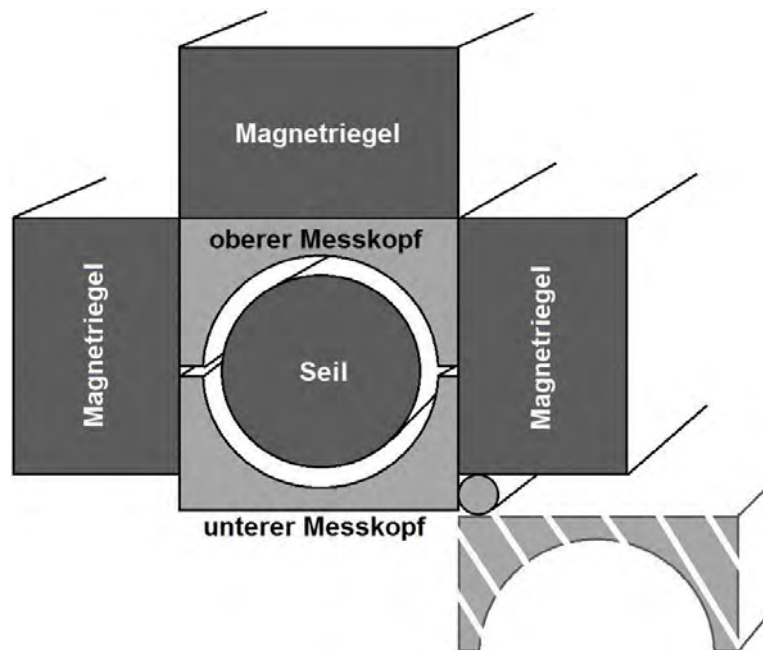


Abbildung 11: Typisches U-förmiges Prüfgerät.

1.10.2 Teilbare Ausführung — zweischaliges System

Teilbare Ausführungen (siehe Abbildung 12) sorgen in der Regel für eine symmetrische Erregung des Seils, was die wirtschaftlichste Erregung im Hinblick auf den maximalen metallischen Querschnitt, für den das Gerät ausgelegt ist, darstellt. Das System kann für Auf- und Abbau in zwei — normalerweise symmetrische — Teile zerlegt werden. Der Öffnungs- und Schließvorgang kann manuell oder automatisiert erfolgen. Für kleinere Seilquerschnitte vorgesehene Geräte können manuell betrieben werden, da die Magnetkräfte von einer einzelnen Person sicher gehandhabt werden können. Bei größeren Geräten ist ein automatisches System erforderlich.

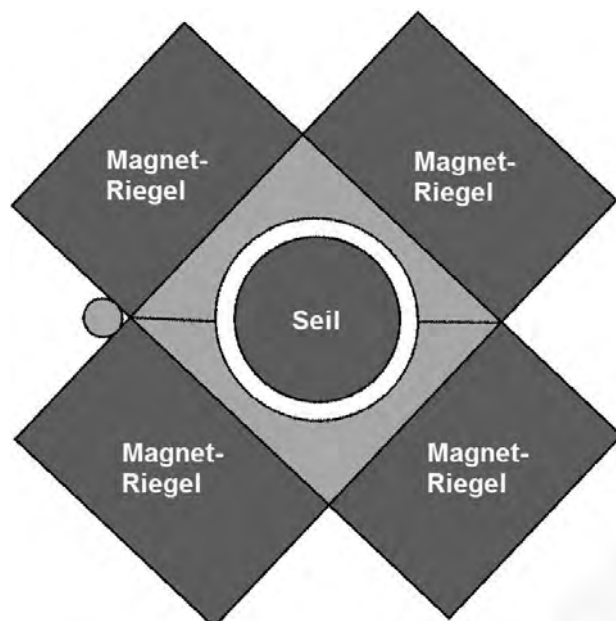


Abbildung 12: Typisches zweischaliges Prüfgerät.

1.10.3 Teilbare Ausführung — modulares Magnetriegelsystem

Eine andere Art der teilbaren Ausführung (siehe Abbildung 13) ist für die Prüfung von Seilen mit äußerst großem Querschnitt ausgelegt. Derartige Systeme sind für Querschnitte von bis zu 140 mm verfügbar. Die magnetische Erregung von sehr dicken Seilen für Offshore-Kräne sowie Tragseile bedingt sehr schwere Magnetelemente und extrem hohe Kräfte, die vor Ort nicht sicher gehandhabt werden können. Deshalb wird zunächst ein leichter, nichtmagnetischer Rahmen mit integrierten Messköpfen am Seil angebracht und anschließend die einzelnen Magnetelemente am Rahmen montiert.

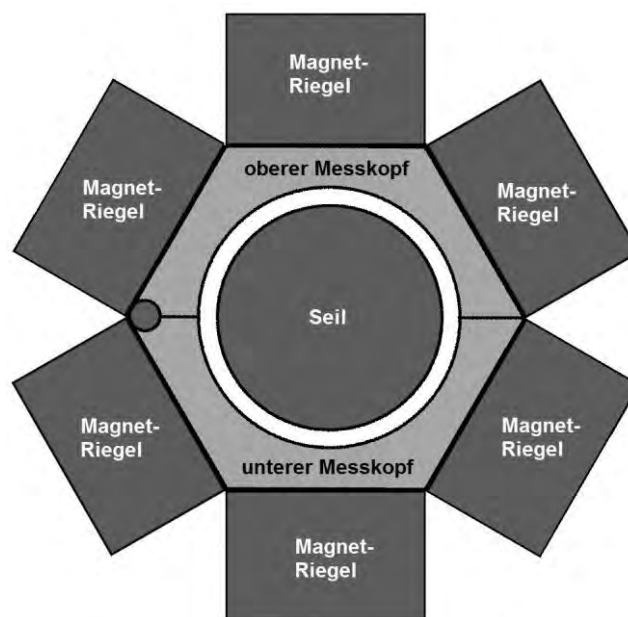


Abbildung 13: Typisches Prüfgerät mit einzeln abnehmbaren Magneten.

1.10.4 Gleichstromerregung

Die Erregung mittels Gleichstrom war die ursprünglich für die magnetische Seilprüfung genutzte Technik. Sie wird nun wieder eingeführt, da die Seilquerschnitte im Brückenbau und in der Offshore-Industrie immer größer werden, so dass Lösungen mit Permanentmagneten nicht praktikabel sind. Die elektrische Erregung kann wie beim Integra-System (siehe "Rückblick" in Abschnitt 1.2) durch massive, teilbar ausgeführte Spulenelemente erfolgen. Bei größeren Geräten ist ein Kupferdraht um das Seil zu wickeln. Des Weiteren ist eine tragbare Gleichstromquelle erforderlich. Vergleiche haben gezeigt, dass die Qualität der Messergebnisse bei der Verwendung elektromagnetischer Spulen deutlich besser ist als bei Dauermagneterregung.

1.11 Feldkalibrierung / magnetische Flussdichte

Die Kalibrierung der Leistung eines Prüfgeräts wird im Anhang der Norm EN 12927 beschrieben. Über eine axiale Länge des halben gegebenen maximalen Seildurchmessers d_{\max} muss die Magnetisierungseinheit eine magnetische Flussdichte B von 1,9 bis 2,3 Tesla erzeugen können. Gemessen wird in einer Spule, die ein Seil (oder einen Prüfling aus Metall bei der Kalibrierung) mit dem maximalen metallischen Querschnitt A_{\max} , für den das Gerät ausgelegt ist, umfasst (siehe Abbildung 14). Innerhalb dieses Bereichs darf der Querschnitt des dünnsten Seils, dessen Prüfung mit demselben Gerät zulässig ist, nicht kleiner sein als $A = A_{\max} / 4$. Andernfalls ist durch Messungen nachzuweisen, dass die magnetische Flussdichte im dünnen Seil 2,4 Tesla nicht übersteigt.

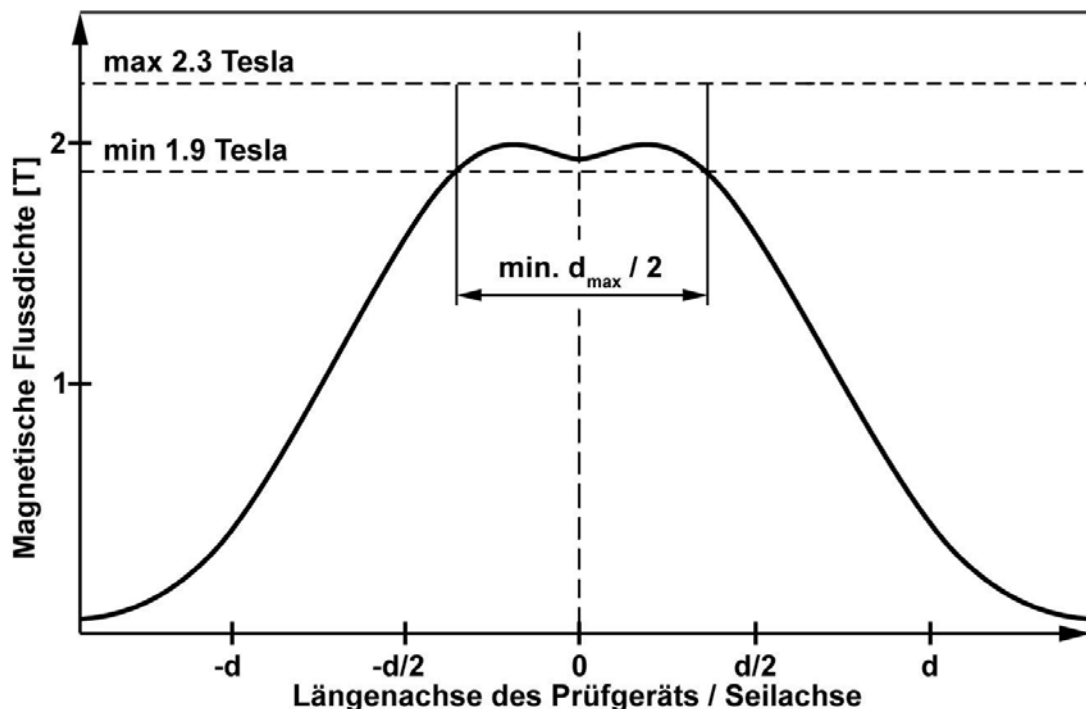


Abbildung 14: Kalibrationskurve für die magnetische Flussdichte nach EN 12927

1.12 Sensoren

1.12.1 Spulen

Spulenmessköpfe bestehen aus sehr dünnem Kupferdraht mit einer Dicke von nur wenigen Mikrometern, der in mehreren Hundert Windungen zu einer Halbspule gewickelt wird. Der Spuleninnendurchmesser sollte unter Berücksichtigung von Vibrationen im Betrieb, eventuellen Verdickungen oder Spleißknoten bei Litzenseilen möglichst nahe beim Seildurchmesser liegen. Nach dem Induktionsgesetz (1) von Lenz und Faraday ist eine Veränderung der aktiven Fläche der Spule, der magnetischen Flussdichte oder des metallischen Querschnitts des Prüflings erforderlich, damit die Spule ein Signal erzeugt. Das

bedeutet faktisch, dass für die Spule eine Relativbewegung von Fehlstellen durch den Messkopf mit ausreichender Geschwindigkeit erforderlich ist, damit eine messbare Veränderung des Streufelds entsteht. Mit einem Spulenmesskopf sind statische Messungen nicht möglich. Grundsätzlich gibt es zwei Spulenkonstruktionen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

1.12.1.1 Radialspulen

Radialspulen weisen eine aktive Schleife rund um die Seiloberfläche auf, wodurch sie auf die Veränderung der Magnetfeldkomponenten ansprechen, die sich vom Seil aus radial ausbreiten. Enthält der Messkopf ausschließlich Radialspulen, gibt es in der Regel zwei verschiedene Kanäle, die von Spulen unterschiedlicher Weite gebildet werden.

Die breitere Spule, die im Normalfall mehr als 10 mm weit ist, wird für gewöhnlich als Hauptkanal bezeichnet, weil sie auf Drahtbrüche, Korrosion und Oberflächenfehler besser anspricht. Sie liefert ein glattes, aber unterscheidungskräftiges Signal und ist weniger anfällig für leichte Vibrationen oder geringfügige Verformungen.

Der Kanal der engeren Spule, die nur wenige Millimeter breit ist, dient normalerweise als unterstützender Kanal, der beispielsweise empfindlicher auf Drahtbruchhäufungen reagiert. Des Weiteren erzeugt er aussagekräftigere Signale bei Drahtbrüchen mit einer nur sehr kleinen Lücke.

1.12.1.2 Axialspulen

Axialspulen weisen eine aktive Schleife in einer Ebene senkrecht zur Seilachse auf, wodurch sie auf die Veränderung der Magnetfeldkomponenten ansprechen, die sich vom Seil aus axial ausbreiten. Auf diese Spulenordnung wird hier nicht näher eingegangen, weil sie bei magnetischen Prüfgeräten für Seilbahnseile selten verwendet wird.

1.12.2 Hall-Effekt-Sensor

Im Gegensatz zu Spulen kann die Magnetfeldstärke mit Hall-Effekt-Sensoren im statischen Betrieb gemessen werden, da sie nicht auf dem Induktionsgesetz sondern auf der Lorentzkraft, die auf den Sensor einwirkt, beruhen (siehe Abbildung 15). Da Hall-Effekt-Sensoren die magnetische Flussdichte B direkt messen, kann man mit ihnen auch bei sich verjüngenden Seilabschnitten eine Messung des Verlusts an metallischem Querschnitt durchführen.

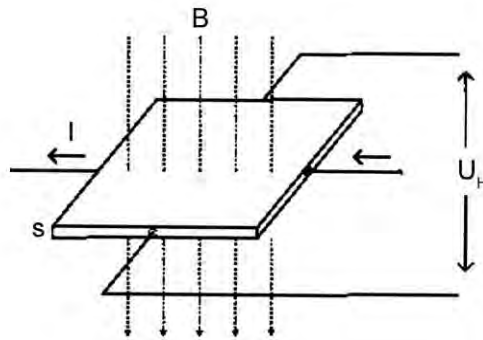


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines Hall-Effekt-Sensors.

Der Hall-Effekt-Sensor verhält sich gemäß Formel (2):

$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{s} \quad (2)$$

mit:

- U_H – Hall-Ausgangsspannung
- R_H – Widerstand des Hall-Sensors
- I – Stromstärke
- s – Dicke des Leiters
- B – magnetische Flussdichte (der einzige veränderliche Eingangsparameter)

Hall-Effekt-Sensoren sind mit unterschiedlicher Empfindlichkeit erhältlich, die in Millivolt pro Gauß (mit 1 Tesla = 10.000 Gauß) angegeben wird. Aus den Signalen mehrerer Hall-Effekt-Sensoren, die gleichmäßig um das Seil angeordnet sind, kann eine herkömmliche 2D-Kurve erstellt werden, welche dieselben typischen Fehlersignale aufzeigt wie die Spulenmessköpfe.

1.13 Hochauflösende Seilprüfung

Nussbaum beschrieb 1999 in seiner Dissertation [7] eine Methode für die Berechnung des 3D-Felds für Fehlstellen in einem Drahtseil. Das war der Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Systems zur Messung des von Drahtbrüchen verursachte 3D-Streifelds zur Verifizierung der Berechnungen. Als Ergebnis entstand ein Messkopf mit einem Ring von Hall-Effekt-Sensoren, die gleichmäßig um den Seilumfang platziert sind (siehe Abbildung 16). Das System wurde als hochauflösende magnetische Seilprüfung bezeichnet.

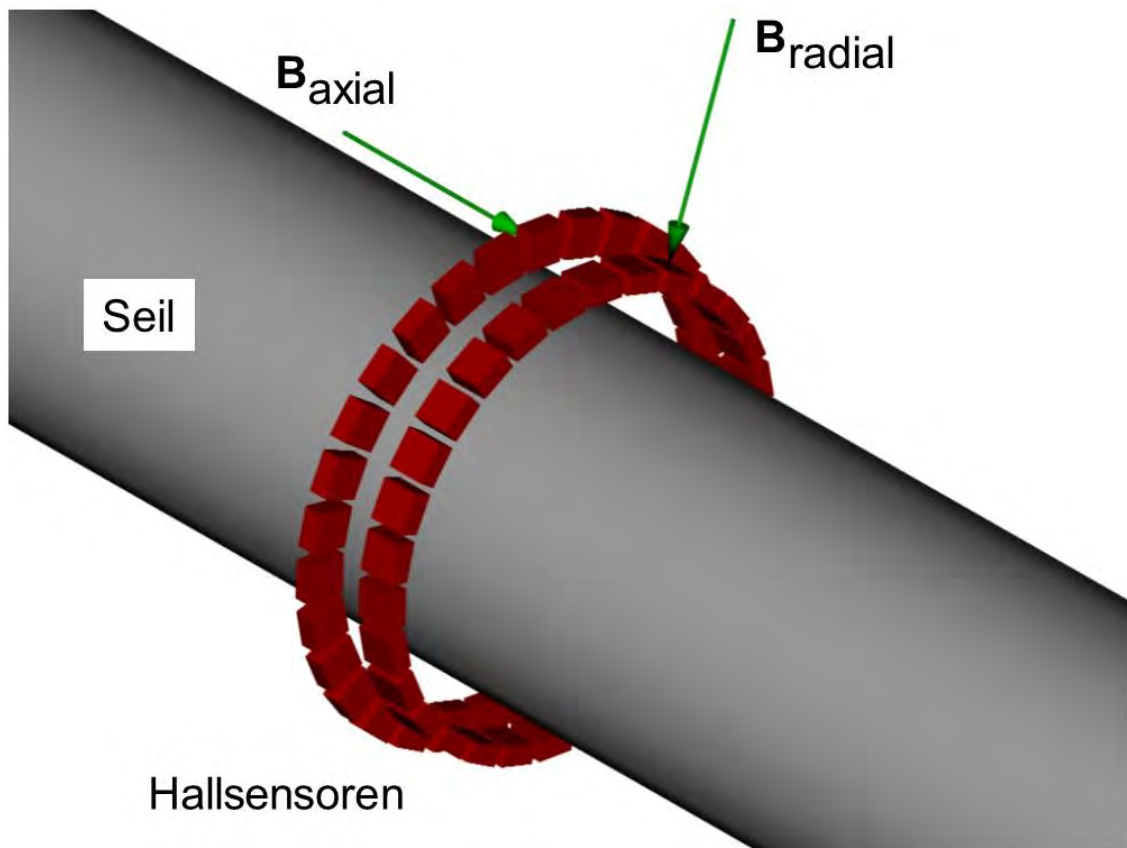


Abbildung 16: Messsensoranordnung bei der hochauflösenden Seilprüfung.

Obwohl FEM-Berechnungen gute Ergebnisse für einzelne Drahtbrüche lieferten (siehe Abbildung 17 und Abbildung 18), wurde festgestellt, dass die von einer Drahtbruchhäufung hervorgerufenen Effekte mit dem auf der linearen Stromdichte basierenden Verfahren genauer abgebildet werden können.

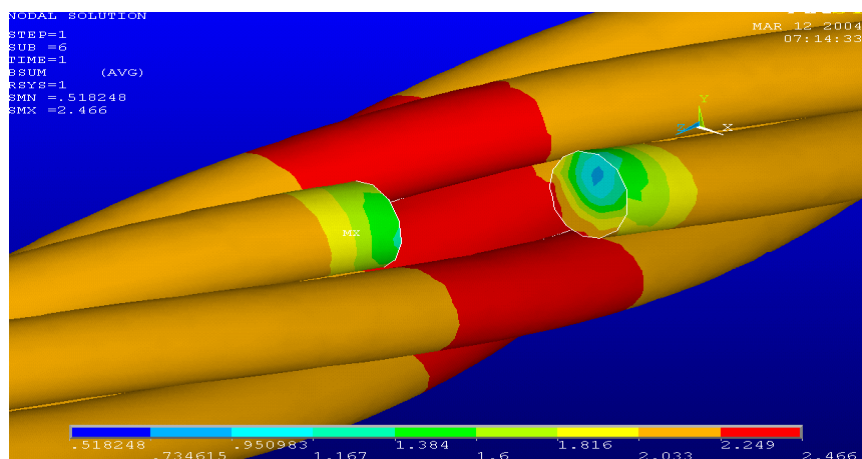


Abbildung 17: Mittels Finite-Elemente-Modellierung simuliertes Streufeld eines Drahtbruchs.

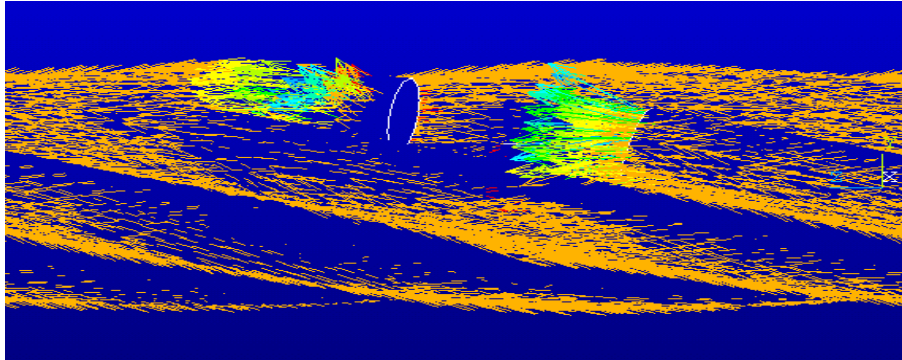


Abbildung 18: FEM-Vektorfeld eines Drahtbruchs.

Mithilfe der mathematischen Ausdrücke (3) und (4), die von der Theorie der linearen Stromdichte abgeleitet sind, kann eine 3D-Hüllkurve des Streufelds aufgebaut werden (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20 sowie die Legende in Tabelle 3).

$$B_{\text{axial}}(z_n) = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sum_k \Delta B(z_k) \cdot \frac{2(z_k - z_n)^2 - (a)^2}{\left((z_k - z_n)^2 + (a)^2 \right)^{5/2}} \quad (3)$$

$$B_{\text{radial}}(z_n) = \cos \alpha \cdot \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sum_k \Delta B(z_k) \cdot \frac{3 \cdot (z_k - z_n) \cdot a}{\left((z_k - z_n)^2 + (a)^2 \right)^{5/2}} \quad (4)$$

$B_{\text{axial, radial}}$	mT	axiale / radiale Komponenten der magnetischen Flussdichte des Fehlstellenfelds
z_n, z_k	mm	Längskoordinate in Bezug auf das Drahtbruchende
I	A	Strom
d	mm	Drahtdurchmesser
ΔB	T	Flussdichtedifferenz
a	mm	Abstand des Messpunkts auf der Oberfläche von der Seilachse
α	Grad	Winkel

Tabelle 3: In den Formeln von Nussbaum [7] verwendete Nomenklatur.

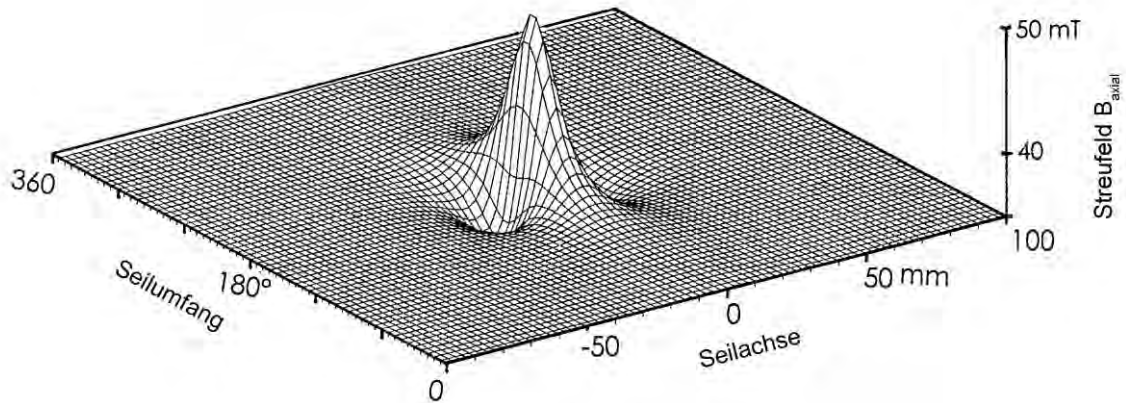


Abbildung 19: Theoretisches Streufeld für einen einzelnen Drahtbruch.

Dieselbe Methode kann zur Modellierung von mit den Hall-Messköpfen durchgeführten 3D-Streufeldmessungen für mehrere Fehlstellen verwendet werden (siehe Abbildung 16). Erhält der Prüfer Tools zum Einstellen der visuellen Anzeige und zum Anpassen der Farbpalette für die Darstellung bedenklicher und unbedenklicher Werte, kann eine weit detailliertere Interpretation der dargestellten Signale als bei herkömmlichen 2D-Spulensignalen vorgenommen werden.

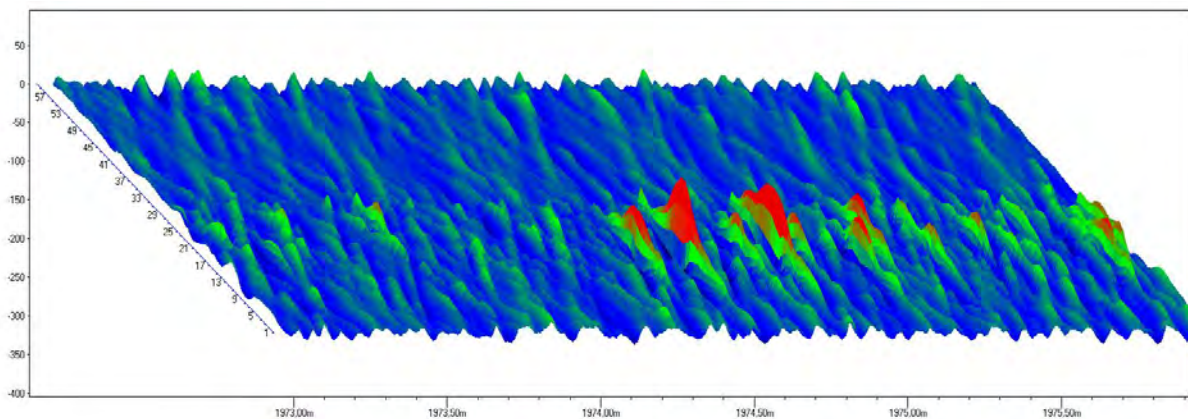


Abbildung 20: 3D-Anzeige von mit dem hochauflösenden Prüfgerät gemessenen Drahtbruchsignalen.

Mit diesen Verfahren kann man mehr Informationen über eine Fehlstelle aus der Form des Magnetfelds entnehmen:

- Lokalisierung am Seilumfang (z. B. Ober- oder Unterseite eines Tragseils),
- Form des Schadens,
- Anordnung von Drahtbruchhäufungen,
- Tiefe innerhalb des Seils,
- (bei Litzenseilen) die Verteilung von Drahtbrüchen, z. B. in einer einzelnen Litze.

Die hochauflösende Prüfung wird vorwiegend zur Kontrolle von schadhafte ehemaligen Sattelbereichen an verschobenen Tragseilen genutzt. Die Prüfung liefert Daten, die bei der Evaluierung des Schadens und der Bestimmung des Schädigungsmechanismus hilfreich sein können.

1.14 Kalibrierung des Prüfgeräts

In der Kalibrierung sollte nachgewiesen werden, dass ein bestimmtes Prüfgerät einen vorgegebenen kleinen Drahtschaden innerhalb des maximalen metallischen Querschnitts eines Seils, für das das Gerät ausgelegt ist, erkennen kann. Ein Beispiel für ein mögliches Kalibrierungsverfahren ist in der Norm EN 12927-8 aufgeführt. Ein korrekt kalibriertes Gerät gewährleistet, dass die Qualität der magnetischen Seilprüfung dem Stand der Technik entspricht. Der Prüfer sollte sich jedoch dessen bewusst sein, dass es verschiedene Arten von Schäden gibt, die von keinem MRT-Gerät erkannt werden können (siehe Abschnitt 5.5 "Grenzen der MRT-Technologie und Hauptprobleme").

1.15 Entfernungsmessung

Um ein MRT-Signal der entsprechenden Stelle am geprüften Seil richtig zuordnen zu können, ist eine genaue Entfernungsmessung erforderlich. Dafür wird üblicherweise ein Messrad (siehe Abbildung 21) verwendet, das am Messkopf befestigt und vom geprüften Seil oder bei der Prüfung eines Tragseils von einer Rolle des Kabinenlaufwerks angetrieben wird. Am Messrad ist ein Impulsgeber angebracht, der Bewegungsinckremente liefert, anhand derer das Signal lokalisiert werden kann.

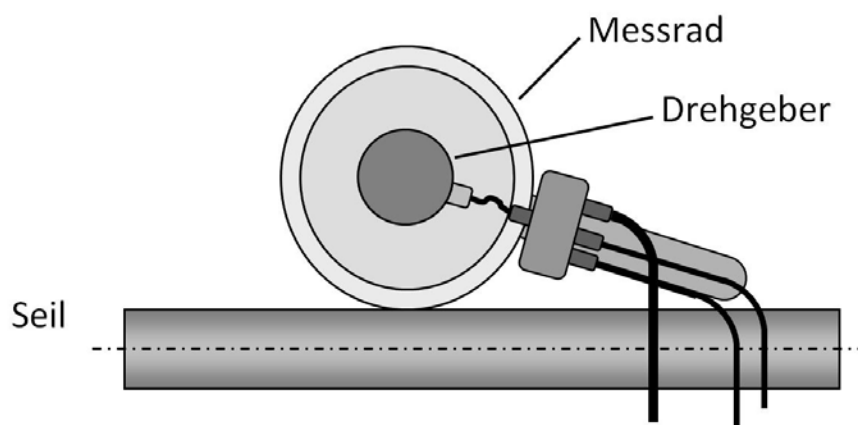


Abbildung 21: Am Seil montiertes Messrad.

2 Prüfungsaufbau

Zusammenfassung: MRT-Prüfungen können entweder an einem stehenden Seil mit einem MRT-Gerät, das sich entlang des Seilfelds bewegt, oder mit einem stationären MRT-Gerät, durch das sich das Seil bewegt, durchgeführt werden. Zur Aufzeichnung der Signale des MRT-Geräts für die Auswertung wird ein Datensystem mittels abgeschirmtem Kabel oder WiFi angeschlossen. Die Einzelheiten des Aufbaus und der Prüfbedingungen, die die Zuverlässigkeit des MRT-Verfahrens erheblich beeinflussen, werden in diesem Abschnitt beschrieben. Auf weitere wesentliche Aspekte im Zusammenhang mit der Sicherheit des Seils, der Seilbahn, der MRT-Ausrüstung und den beteiligten Personen wird ebenfalls eingegangen.

2.1 Voraussetzungen

2.1.1 Allgemeines

Vor der Durchführung einer MRT-Prüfung ist es wichtig, dass sich der Prüfer mit dem Umfeld, wie zum Beispiel Kenndaten des Seils und der entsprechenden Seilbahn, vertraut macht. Dann ist es nötig, die Funktion des zu prüfenden Seils zu bestimmen, d. h. handelt es sich um:

- ein Tragseil,
- ein Spannseil,
- ein Zugseil oder
- ein Förderseil.

Davon hängt es ab, ob das Seil steht oder läuft, was unterschiedliche Vorgehensweisen beim Prüfaufbau bedingt.

Bei stehenden Seilen, wie z. B. Spannseilen, Tragseilen auf Rollenketten usw., muss das Seil abgenommen, verschoben oder belastet werden, damit die MRT-Prüfung korrekt vorgenommen werden kann. Tritt während der MRT-Prüfung ein Signal mit außergewöhnlicher Form oder Amplitude auf, muss der Prüfer eine Sichtkontrolle oder eine andere geeignete Untersuchung durchführen. Verfügbare Unterlagen über die Vorgeschichte des Seils, wozu insbesondere Aufzeichnungen der für frühere Prüfungen verantwortlichen Stellen gehören, sind zu berücksichtigen, um die voraussichtliche künftige Verschlechterung des Seilzustands ausgehend von den bei der aktuellen Prüfung erkannten Schäden im Kontext der Vorgeschichte verstehen zu können.

Wahl des richtigen Aufbaus des MRT-Geräts mit geeigneten Parametern!

2.1.2 Prüfungsvorbereitung

Im Einzelnen benötigt der Prüfer bei der Vorbereitung einer MRT-Prüfung insbesondere folgende Informationen:

- Nenndurchmesser des Seils und ggf. Maximaldurchmesser an Spleißknoten für die richtige Wahl des Messkopfes, des Spulendurchmessers und der Gleitführung,
- Konstruktion und Querschnitt des Seils sowie Anteil am metallischen Querschnitt für die verschiedenen Drähte im Verband, was für die Bestimmung der bei der Prüfung erreichbaren Genauigkeit wichtig ist,
- Längsschnitt der Seilbahn und Lage der Enden von Stützensätteln, kleinen Abrolldurchmessern, Positionen von Seilreiterklemmen und Stellen mit Biegewechseln, was alles für die richtige Wahl des MRT-Aufbaus und die Gewährleistung sicherer Arbeitsbedingungen wichtig ist,
- die voraussichtliche Länge des zu prüfenden Seils und ggf. die Anzahl der Spleiße,
- die Witterungsverhältnisse während der MRT-Prüfung sind sowohl für die Sicherheit als auch für die Qualität der erfassten Daten ebenfalls wichtig.

2.1.3 Durchführung der Prüfung

Die Vorgehensweise für die MRT-Prüfung ist klar festzulegen, so dass bei der getrennten Prüfung verschiedener Abschnitte desselben Seils sichergestellt ist, dass sich diese Abschnitte überschneiden. Werden unterschiedliche Abschnitte eines Seils, z. B. freie Länge, Rollenketten- und Gegengewichtsabschnitte, geprüft, ist es empfehlenswert, einen detaillierten Prüfungsplan für die einzelnen Abschnitte, einschließlich eines Zeitplans, zu führen, damit keine kritischen Teile des Seils ausgelassen werden.

Das MRT-Gerät sollte alle hier aufgeführten Anforderungen erfüllen:

- Zur Gewährleistung der richtigen Magnetisierung muss der Seildurchmesser in den für den Messkopf angegebenen Bereich fallen.
- Zur Verringerung der Auswirkungen von Luftspalten ist bei der Wahl der Spulengröße auf den Seildurchmesser an Spleißknoten Bedacht zu nehmen. Zu beachten ist aber auch, dass das Seil mittig innerhalb der Spulen verlaufen sollte, um die axiale Symmetrie der Messungen sicherzustellen.

Wahl und Zweck von Prüfmarkierungen

Ferromagnetische Stahldrähte, die mit Klebeband auf der Oberfläche befestigt werden, können als Markierungen verwendet werden, um:

- zu kontrollieren, dass das MRT-Gerät funktioniert,
- die Position zu Beginn/am Ende der Prüfung anzuzeigen,
- die Amplitude des MRT-Signals im Verhältnis zum Durchmesser erkennbarer Drähte zu kalibrieren,
- die Signalpolarität zu kontrollieren.



Abbildung 22: Montage des MRT-Geräts bei einem stehenden (links) und einem laufenden Seil (rechts).

2.2 Montage des MRT-Geräts

2.2.1 Montage am stehenden Seil

Das MRT-Gerät ist auf einem Wagen starr zu montieren und, wie in Abbildung 22 (links) gezeigt, entlang des Seilfelds zu ziehen. Über die ganze Seillänge ist für ausreichend Freiraum um das MRT-Gerät zu sorgen, wobei der Prüfer sorgfältig auf die Position von Stützen, Sätteln und Seilreitern achten muss.

Während der gesamten Prüfung muss die Kommunikation zwischen Prüfer und Fahrstand aufrechterhalten werden, um die Prüfungsgeschwindigkeit zu regeln und um die Anlage nötigenfalls anhalten zu können. Für Datenerfassungssysteme kann eine angemessene tragbare Stromversorgung erforderlich sein. Zusätzliche Rollen können anstelle einer Gleitführung verwendet werden, um die Reibung am MRT-Gerät zu verringern. Es ist sicherzustellen, dass die Kabelverbindung bei der unterschiedlichen Neigung des Wagens auf der Strecke funktioniert. Zu beachten ist, dass der Wagen samt Prüfgerät,

Übertragungsausrüstung und allfälligen weiteren Vorrichtungen möglicherweise nicht in die Gegenstation passt.

Langsamer in der Nähe von Stützensätteln!

Bei der Prüfung von Tragseilen wird für gewöhnlich bei Annäherung an einen Seilabschnitt mit Stützensätteln die Geschwindigkeit reduziert und der Prüfkopf geöffnet.

Dabei ist ein Sicherheitsabstand zu wahren. Aus diesem Grund könnte ein Teil des Seils nicht erfasst werden, so dass es wichtig ist, verschobene Seilabschnitte gründlich zu prüfen. Bei der Prüfung des verschobenen Seils wird empfohlen, die MRT-Prüfung in derselben Richtung durchzuführen.

2.2.2 Montage am laufenden Seil

- Für die Montage des MRT-Geräts ist ein geeigneter Platz in der Seilschleife zu wählen (siehe Abbildung 22, rechts).
- Die Prüfgeschwindigkeit ist ähnlich einzustellen wie in vorangegangenen Prüfungen. Zu beachten ist, dass eine Verringerung der Seilgeschwindigkeit die Vergleichbarkeit mit früheren Ergebnissen erschweren kann, wenn bei der Durchführung der Prüfung Vibrationen die Qualität des MRT-Signals beeinträchtigen. Alternativ kann eine andere geeignete Position für das MRT-Gerät gewählt werden.
- Das MRT-Gerät ist mittels elastischer Verbindung an fixen Punkten anzubringen, wobei nach Möglichkeit eine Bewegung in beide Richtungen zu unterbinden ist. Dies sollte eine Beschädigung des Prüfgeräts während der Seilbewegung vermeiden und Vibrationen aufgrund der unebenen Oberfläche von Litzenseilen dämpfen.
- Ein Verdrehen des MRT-Geräts um das Seil ist beispielsweise mittels Gegengewicht zu verhindern.
- Besondere Sorgfalt ist bei Spleißelementen oder entgegenkommenden Fahrzeugen nötig.

Spezielle Seilabschnitte, wie Spleißstellen, erfordern eine zusätzliche Prüfung, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Bei Zugseilen ist es notwendig, zwei MRT-Prüfungen mit unterschiedlich positioniertem Prüfgerät (siehe Abbildung 23) durchzuführen, um das Seil über die gesamte Länge zwischen den Endbefestigungen zu erfassen.

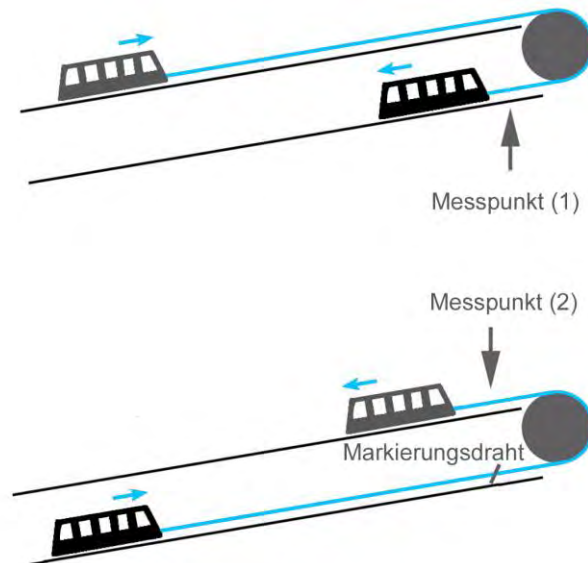


Abbildung 23: Messung von Zugseilen in zwei Schritten.

2.3 Warnhinweis für besondere Seilabschnitte und Seile

Dieses Heft berücksichtigt nicht die spezifischen Prüferfordernisse für besondere Seile und Seilabschnitte, wie Spannseile, Rettungsseile, Steuerseile und Abspannungen, an Stützensätteln, Seilschuhen, Rollenketten und Seilendbefestigungen.

Verarbeitung der magnetischen Streufeldsignale und Analyse der Drahtbrüche

Zusammenfassung: Einige wichtige Aspekte der Signalaufbereitung und der Datenerfassung zur Gewährleistung einer optimalen Qualität der während MRT-Prüfungen gemessenen Magnetsignale werden erklärt. Anschließend wird auf Signalverarbeitungstechniken eingegangen, um verständlich zu machen, wie Drahtbruchsignaturen vom Grundsignal des Seils unterschieden werden können. Allgemeine Richtlinien für die Drahtbruchanalyse werden aufgeführt, wobei die Hauptpunkte anhand von mehreren Fallbeispielen veranschaulicht werden. Im Hinblick auf die Überwindung der Grenzen der zurzeit verfügbaren MRT-Technologien bei der Erkennung von Schäden im Seilinneren werden schließlich Empfehlungen für fortschrittliche Methoden angesprochen.

2.4 Hauptziel und Voraussetzungen

Die Voraussetzungen für Messungen von hoher Güte sind:

1. MRT-Geräte mit einer qualitativ hochwertigen Konstruktion mit:

- ausreichender magnetischen Sättigung des Seils, damit innere Drahtbrüche erkannt werden können;
 - spezieller Ausführung, damit die Ausbreitung axialer Vibrationen im Prüfinstrument vermieden wird.
2. Für die optimale Durchführung der magnetischen Seilprüfung ist Folgendes nötig:
- angemessene Wahl des Durchmessers und der Breite der Messspulen im Verhältnis zum Seildurchmesser;
 - eine ruhige Bewegung und eine ausreichend hohe Geschwindigkeit des Seils in Bezug auf das MRT-Gerät ($v > 0,2 \text{ m/s}$). Bei manuellem Betrieb sind Rollen zu verwenden, welche die Bewegung des MRT-Geräts in Bezug auf das Seil ausreichend ruhig halten, da andernfalls die Signalqualität leidet;
 - ein modernes Datenerfassungssystem mit Aufzeichnung am Computer oder auf Papier. Dieses System sollte das volle Frequenzspektrum des Seilprüfinstruments erfassen können, z. B. Wellenzahlen (Ortsfrequenzen) bis ungefähr 250 m^{-1} bei einer Spulenbreite von "4 mm". Anmerkung: Dieser Wert ist mit der erwarteten Instrumentengeschwindigkeit zu multiplizieren, damit man die obere Grenzfrequenz in Hertz erhält.

2.5 Instrumentierung und Datenerfassung

Der erste wesentliche Punkt bei der Konstruktion eines MRT-Geräts betrifft die Entscheidung über die Signale, die erfasst werden sollten, um Drahtbrüche nachzuweisen. Klassische, auf dem Streufluss basierende MRT-Geräte können folgende Informationen liefern:

1. analoge Signale für jede Streuflusspule des Instruments,
2. Position und Geschwindigkeit des Seils relativ zum Instrument mit analoger oder digitaler Ausgabe,
3. aktuelle Bewegungsrichtung,
4. zusätzliche Signale je nach Funktionsumfang des MRT- und des Aufzeichnungsgeräts.

Zeit oder Entfernung

- **Vorteile:** In Bezug auf die Anwendung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems in der Signalverarbeitung scheint die zeitabhängige Erfassung einen signifikanten Vorteil gegenüber der entfernungsabhängigen Erfassung zu haben, da alle relevanten dynamischen Informationen in zeitabhängigen Signalen enthalten sind. Wenn die Abtastfrequenz bekannt ist, können Anti-Aliasing-Filter eingesetzt werden, um unerwünschte Artefakte (Störsignale) erfolgreich zu entfernen.

- **Nachteile:** Da die Daten von Seilprüfungen positionsinvariant und nicht zeitinvariant sind, müssen die erfassten zeitabhängigen Daten für die Auswertung wiederum in Entfernungsdaten umgewandelt werden. Da die relative Seilgeschwindigkeit während einer MRT-Prüfung normalerweise nicht konstant ist, werden die erfassten zeitabhängigen Daten für gleichmäßige Abstände vorliegen. Ein neuerliches Abtasten mit Hilfe von Interpolationsverfahren kann durchgeführt werden, aber eine verlustfreie Signalvorverarbeitung mit Anti-Aliasing-Filter kommt nicht mehr in Frage, da die dynamischen Komponenten des Signals verloren gehen. Anmerkung: Werden MRT-Prüfungen bei konstanter Geschwindigkeit durchgeführt, treten kaum Unterschiede zwischen zeit- und entfernungsabhängigen Aufzeichnungen auf!

Aus der Sicht der Signalverarbeitung sind die ersten drei oben angeführten Signale für eine optimale Analyse notwendig. Dennoch ist ein Kompromiss zwischen einer verlustfreien Qualität des Drahtseilsignals und der anfallenden Datenmenge zu finden.

Bei den aktuell verfügbaren Geräten sind drei verschiedene Datenerfassungsverfahren gängig:

1. zeitabhängige analoge Erfassung, die mit der Aufzeichnung auf Papier vergleichbar ist,
2. zeitabhängige digitale Erfassung,
3. entfernungsabhängige digitale Erfassung.

Die analoge Erfassung auf Papier ist veraltet und wird nur noch aus historischen Gründen und zwecks Hardwarekompatibilität genutzt.

Analog oder digital

- **Vorteile:** Moderne Aufzeichnungsgeräte können das Spulensignal ohne Verzerrung über die gesamte Bandbreite des Prüfinstruments anzeigen und sorgen so für MRT-Prüfungen von guter Qualität. Im Vergleich zur digitalen Erfassung bietet die Ausgabe auf Papier einen besseren Überblick über die gemessenen Signale.
- **Nachteile:** Werden komplexe Signale auf Papier aufgezeichnet, kann es nötig sein, die Erfassung oft mit unterschiedlichen Einstellungen zu wiederholen, um eine gute Analyse zu ermöglichen. Nur erfahrene MRT-Prüfer können mit solchen Verfahren vertraut sein.

Ob die Vor- und Nachteile der zeitabhängigen gegenüber jenen der entfernungsabhängigen Erfassung überwiegen, ist nicht offenkundig. Die zeitabhängige Datenerfassung mag zwar auf den ersten Blick viel unkomplizierter erscheinen, aber die entfernungsabhängige Erfassung ist aus physikalischer Sicht sinnvoller, da die meisten zentralen Merkmale der Drahtseilsignale positionsinvariant und nicht zeitinvariant sind.

2.6 Signalaufbereitung

MRT-Signale müssen vor der Abtastung mit einem Analog-Digital-Wandler aufbereitet werden, um hochwertige Aufzeichnungen zu erhalten.

Wichtige Punkte bei der Signalaufbereitung

Aufgrund der hohen Impedanz leiden Signale von Streuflussspulen bei langen Leitungen und Kontaktproblemen. Um solche Probleme zu beseitigen und daraus entstehende Verzerrungen zu vermeiden, kann ein direkt an das Prüfgerät angeschlossener Signalverstärker verwendet werden. Eine weitere Lösung ist die Abtastung des Signals im Prüfgerät selbst. Vor der Abtastung sollte immer ein Anti-Aliasing-Filter verwendet werden, um Probleme bei der Signalauswertung und der digitalen Signalverarbeitung zu vermeiden. Diese Filter sollten so konfiguriert werden, dass sie das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem erfüllen. Übersprechen aufgrund von langen Leitungen zwischen dem Prüfgerät und dem Datenerfassungsgerät ist im Allgemeinen kein Problem, sollte aber bedacht und durch den Einsatz entsprechend abgeschirmter Kabel gering gehalten werden. Derartige Störungen können beispielsweise bei einem geschwindigkeitsabhängigen Offset des Prüfsignals entstehen.

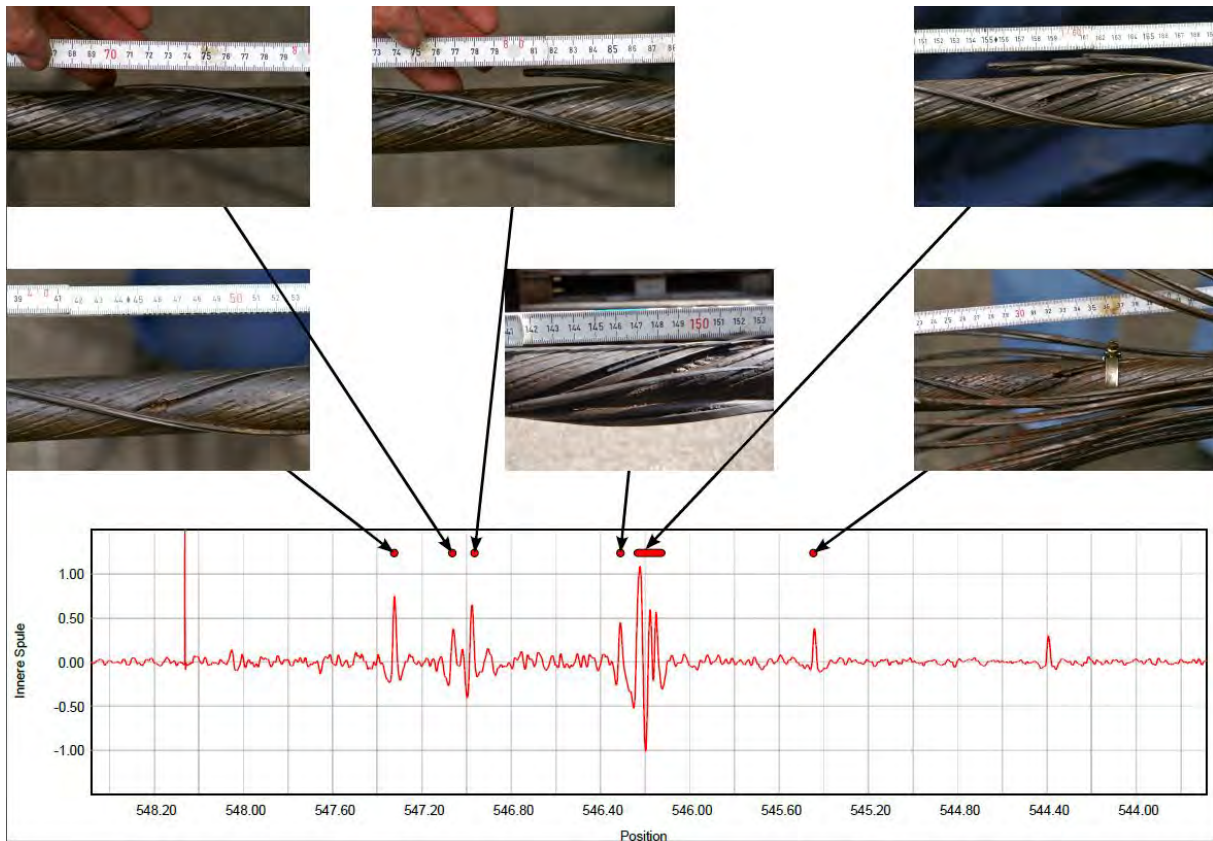


Abbildung 24: MRT-Signale und die dazu gehörigen Drahtbrüche in einem Tragseil (zweite Schicht).

2.7 Signalverarbeitung und Analyse der Drahtbrüche

Drahtbruchsignale bei der MRT sind nicht einfach einzelne Spitzen, die sich klar vom Grundsignal des Seils abheben. In der Praxis setzen sich die MRT-Signale aus folgenden Komponenten zusammen (siehe Abbildung 24):

- Grundsignal (Seilsignatur): die auf die Geometrie des Seils zurückzuführende Signalkomponente (Litzenschlaglänge, Änderung der Drahtsperrung usw.),
- "Nutzsinal": die Komponente des Signals, die mit Seilfehlern jeglicher Art zusammenhängt (Drahtbrüche, Verschleiß, Einkerbungen, Verlust an metallischem Querschnitt),
- Störungen jeglicher Art: Auswirkungen von Wirbelströmen, unregelmäßige Bewegung, elektromagnetische Störungen usw.

Man muss sich dessen bewusst sein, dass ein MRT-Signal aus der Überlagerung von Signalkomponenten, die von verschiedensten physikalischen Effekten verursacht werden, hervorgeht.

Verschiedene Seilanomalien mit ähnlicher MRT-Signatur!

Die Erfassung des Prüfsignals während der MRT-Prüfung entspricht einer mathematischen Transformation, bei der die tatsächliche Seilgeometrie durch das Prüfsignal abgebildet wird. Nach Wahl eines MRT-Gerätetyps und der Prüfrichtung führen echte Fehlstellen im Seil zu einzigartigen MRT-Fehlersignaturen (surjektive Abbildung). Diese Abbildung ist allerdings nicht injektiv, und die tatsächliche Fehlstelle im Seil kann nicht eindeutig aus dem Prüfsignal gewonnen werden. Das Verfahren zur Abbildung des physischen Drahtseils mit Fehlstellen durch das Prüfsignal mit den Fehleranzeigen ist somit "verlustbehaftet". Das bedeutet, dass einige Informationen während des Prüfprozesses verloren gehen und durch keine Interpretation und kein mathematisches Verfahren wiederhergestellt werden können. Folglich ist die Interpretation der Drahtseilprüfsignale nie eindeutig — es gibt bloß Fehlerkonstellationen, die wahrscheinlicher sind als andere.

In der Praxis ähnelt die Drahtbruchanalyse einer "Mustererkennung". Sobald eine Sammlung von Drahtbruchsignaturen aufgrund von Erfahrungswerten explizit bestimmten Arten von Fehlstellen zugeordnet worden ist, werden Prüfer versuchen, diese bekannten Muster im Prüfsignal zu finden. Diese Mustererkennung kann entweder manuell basierend auf der Intuition eines erfahrenen Prüfers oder mit Hilfe mathematischer Verfahren durchgeführt werden.

Vor der Fehlstellenanalyse sollte das Signal aus der Seilprüfung standardisiert werden. Der Offset und die Auswirkungen von Geschwindigkeitsschwankungen müssen so weit wie möglich entfernt werden. Abbildung 25 zeigt eine Zusammenstellung von berechneten Signalmustern für Drahtbrüche in einem Tragseil. Abhängig vom Querschnitt des gebrochenen Drahtes, vom Abstand zwischen den Bruchflächen und der Lage im Seilquerschnitt variieren Größe und Form des Musters erheblich.

Der nichtinjektive* Mapping-Prozess beeinflusst ebenfalls die Analyse. Dafür ist ein Standardanzeigemuster (Suchmuster) zu definieren, das dann im Prüfsignal gesucht werden muss. Dabei kann nur nach Fehlstellen gesucht werden, die standardisiert und einem Anzeigemuster zugeordnet werden können, und ihr Mapping zu Prüfsignalen muss eine signifikante Anzeige in diesen Signalen erzeugen.

* "nichtinjektiv" ist ein mathematischer Begriff, der in diesem Zusammenhang bedeutet, dass mehrere unterschiedliche Seilschäden zu ähnlichen MRT-Signaturen führen können.

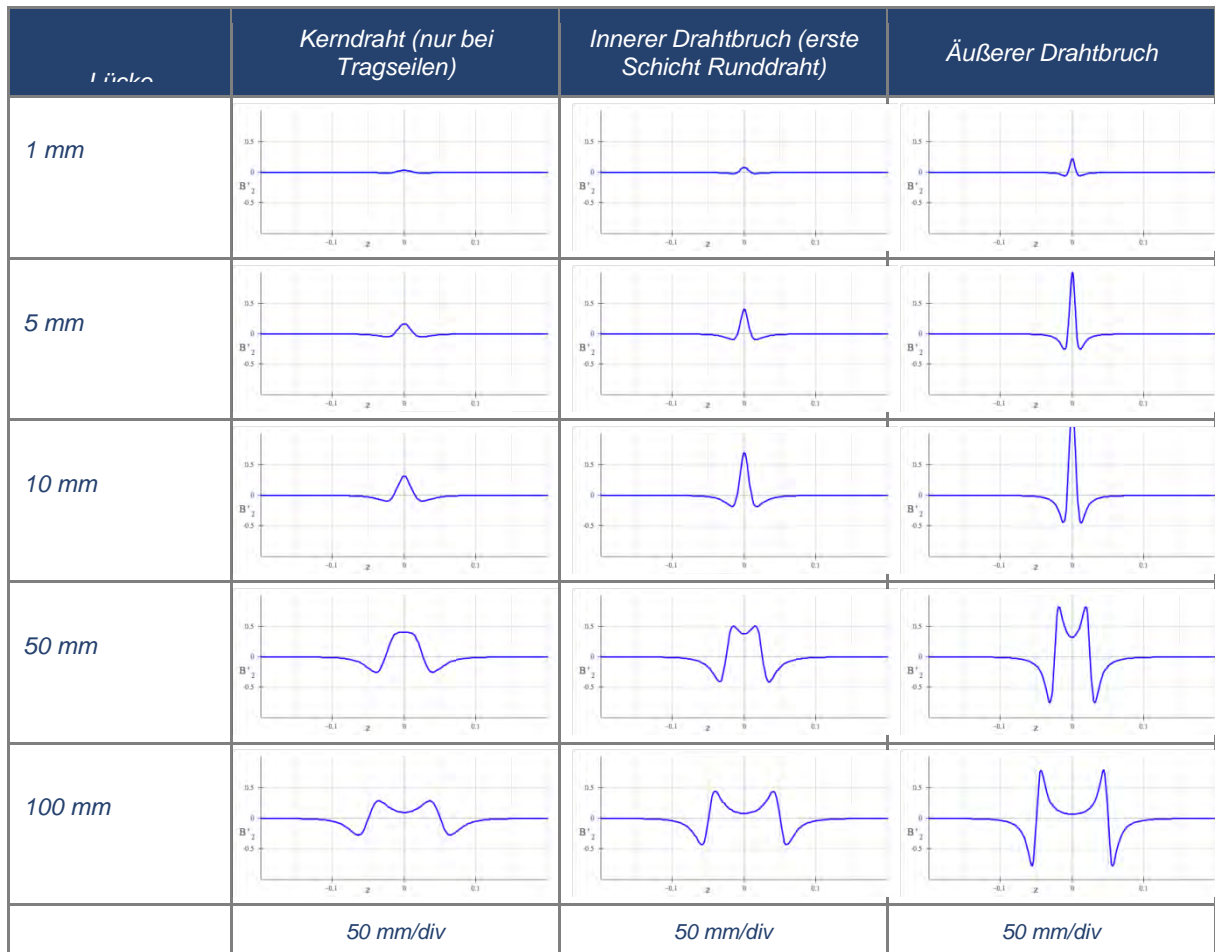


Abbildung 25: Suchmuster in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bruchflächen eines Drahtes (Lücke) und der Lage des Drahts im Seil.

Die Muster betreffen ein 40 mm starkes Seil mit einem Bruch in einem 3 mm dicken Draht. Die horizontale Achse entspricht der Seillänge und die vertikale Achse der verstärkten Spannung der Streufeldspulen. Die Muster wurden mit dem Dipolverfahren berechnet.

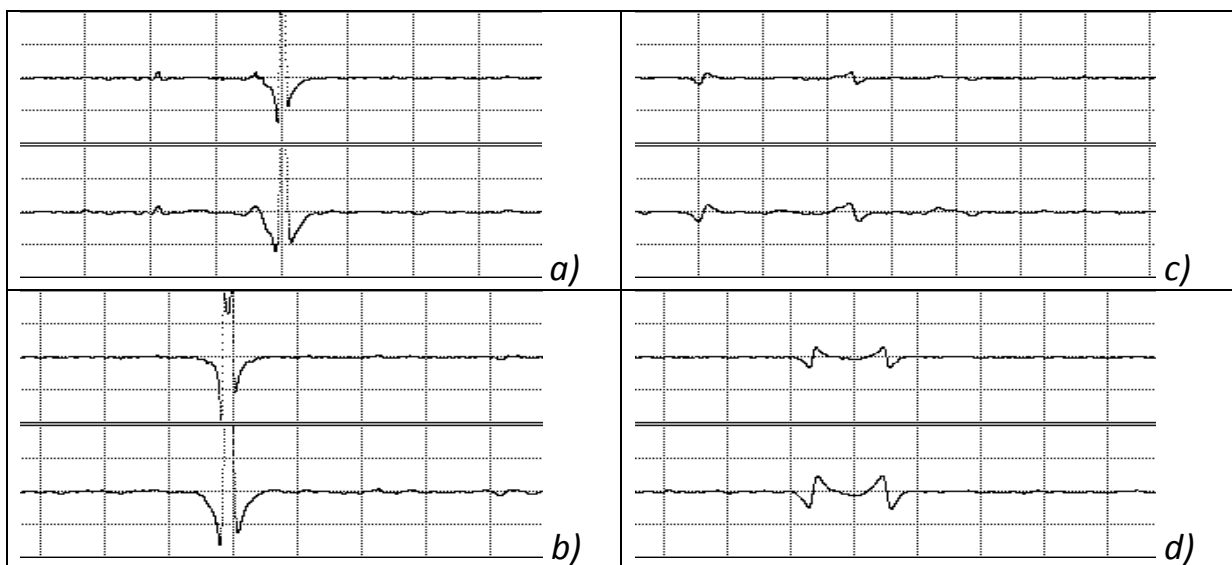


Abbildung 26: Tatsächliche MRT-Signale für Fehlstellen in einem 68 mm starken Tragseil: a) und b) Anzeigen für einen gebrochenen Z-Draht mit unterschiedlicher Lücke; c) und d) Anzeigen für einen fehlenden inneren Draht.

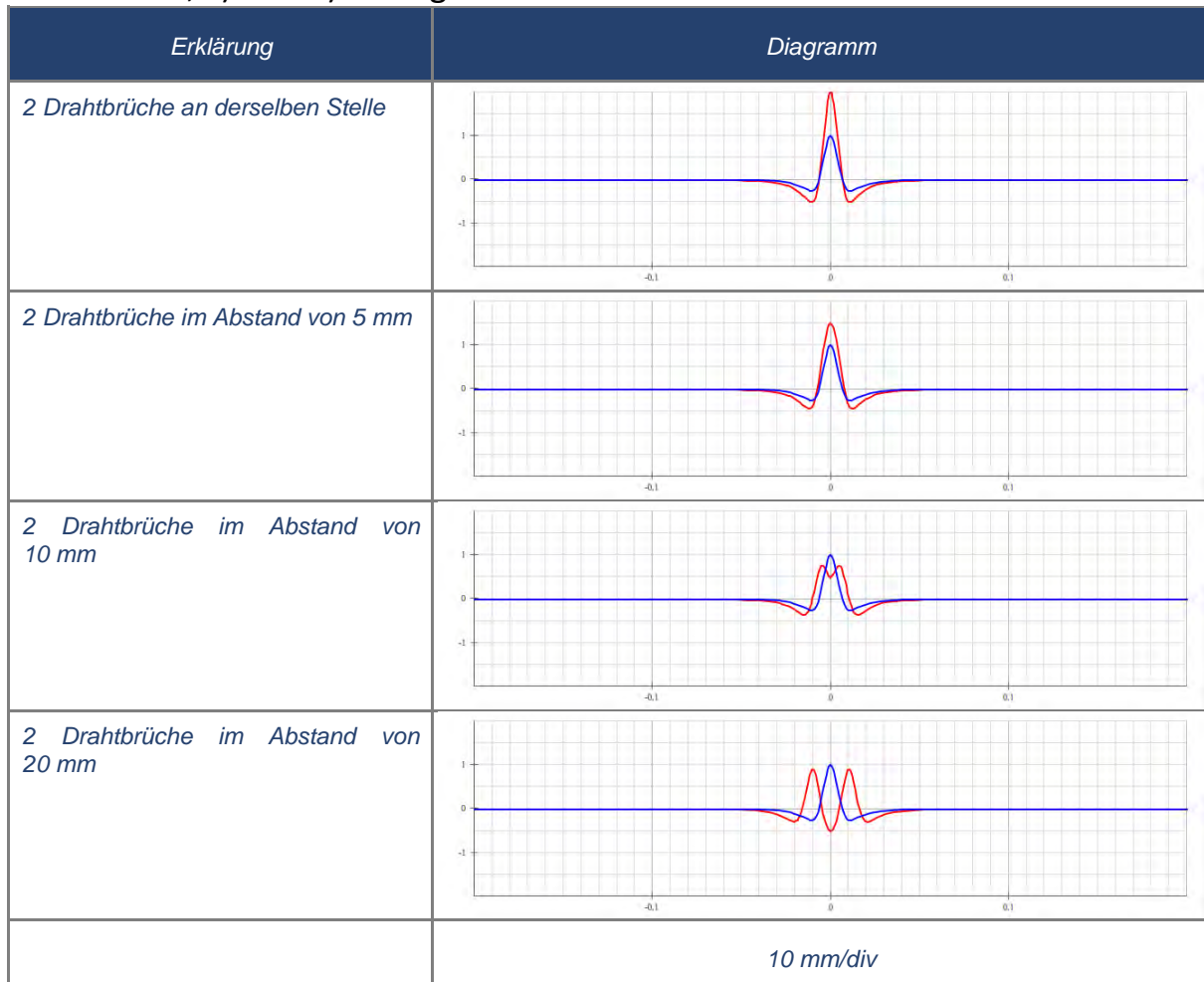


Abbildung 27: Berechnetes Signal für ein typisches Seilprüfgerät; a) blau: einzelner Drahtbruch, b) rot: zwei Drahtbrüche.

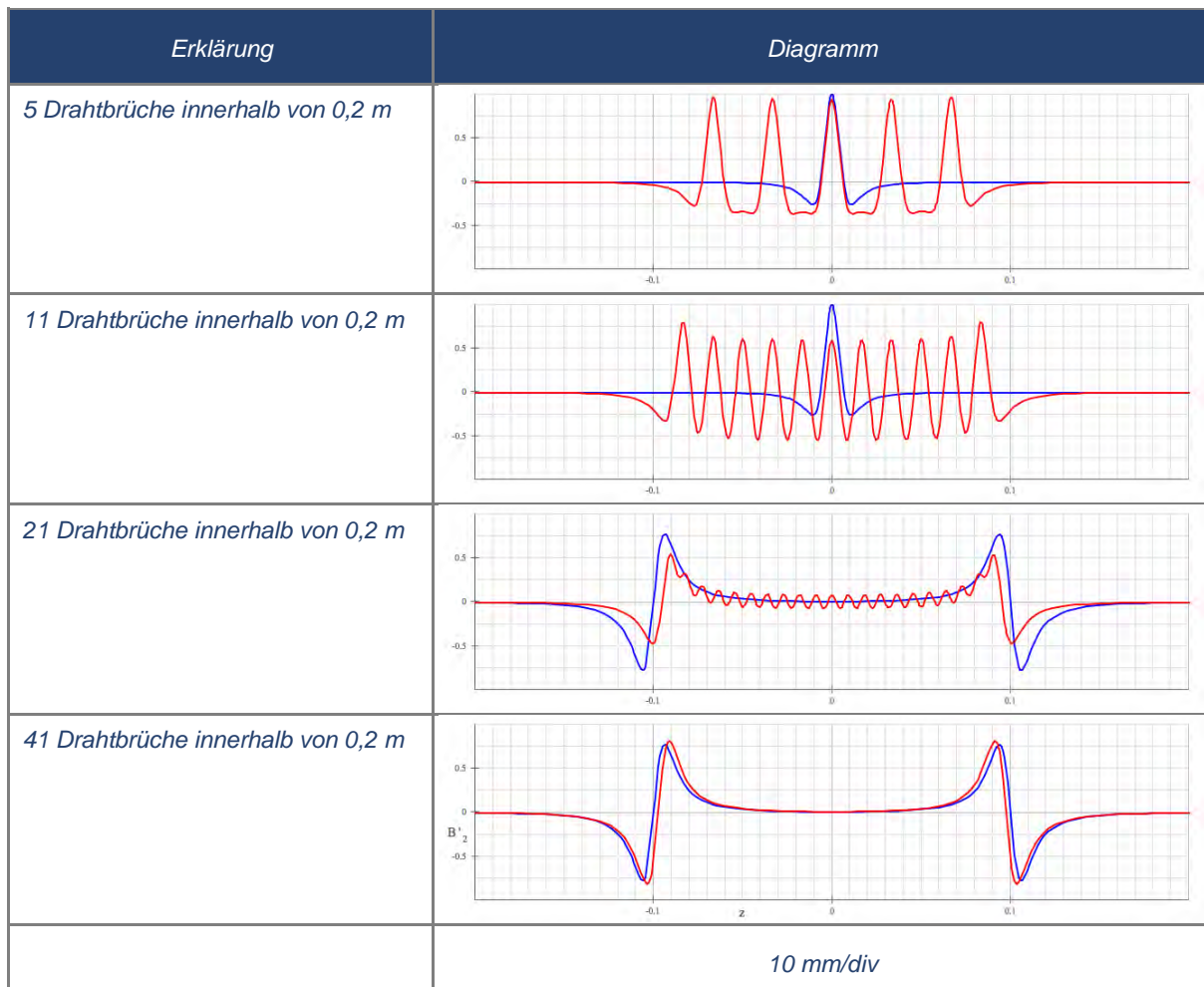


Abbildung 28: Theoretisches Modell für die Auswirkung der begrenzten Auflösung eines typischen Seilprüfgeräts bei einzelnen und mehreren Drahtbrüchen: blau: einzelner Drahtbruch, rot: mehrere Drahtbrüche.

2.8 Grenzen der MRT-Technologie und Hauptprobleme

Die Grenzen der MRT-Technologie betreffen Folgendes:

- Veränderungen des magnetischen Widerstands während der Nutzungsdauer des Seils:** Mehrere physikalische Effekte wirken sich auf das MRT-Signal aus, zum Beispiel die Veränderung des Seilquerschnitts (erwartet), aber auch unerwünschte Effekte wie Wirbelströme im Seil. Derartige Effekte können weder in zeitbasierten noch in entfernungs-basierten Aufzeichnungen identifiziert oder differenziert werden.
- Beschränkte Auflösung der Prüfinstrumente:** Die Spulengeometrie begrenzt die Empfindlichkeit des Prüfinstrumentes auf einen genau definierten Wellenlängenbereich. Fehler außerhalb dieses Bereichs sind kaum erkennbar, z. B. Rostnarben (zu kurze Wellenlänge) oder fast gleichmäßiger Verschleiß (zu lange Wellenlänge).

3. **Grundsignal des Seils:** Der Ausschlag der Fehlersignale im Verhältnis zum Grundsignal des Seils wirkt sich auf das Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) aus. Signale mit einem zu geringen SRV können nicht zuverlässig ausgewertet werden. Das SRV ist bei jeglicher Drahtbruchanalyse zu berücksichtigen. Anmerkung: Seile mit einem SRV, das für eine zuverlässige Auswertung zu gering ist, sollten abgelegt werden.

Zur Vermeidung von Problemen im Zusammenhang mit der begrenzten Auflösung von MRT-Geräten sollten bei der Drahtbruchanalyse alle Unterlagen bisheriger Prüfungen, einschließlich der Messschriebe, eingesehen werden. Nur so kann die Entwicklung der Schäden beurteilt werden: bisherige Messschriebe können auch Hinweise darauf enthalten, ob durch die Verschlechterung die Ablegereife erreicht sein könnte. Man muss sich aber dessen bewusst sein, dass die Prüfberichte im Allgemeinen nicht so ausreichend detailliert sind, dass man Fehldeutungen ausschließen kann.

Ein Beispiel dafür ist die Korrosion im Inneren von Tragseilen, bei der sich gezeigt hat, dass bei der MRT-Analyse manchmal der Verlust an metallischem Querschnitt überschätzt wird. In solchen Fällen ist es deshalb sehr empfehlenswert, ergänzende Kontrollen wie eine Röntgenprüfung durchzuführen, um derartige Fehlinterpretationen zu vermeiden.

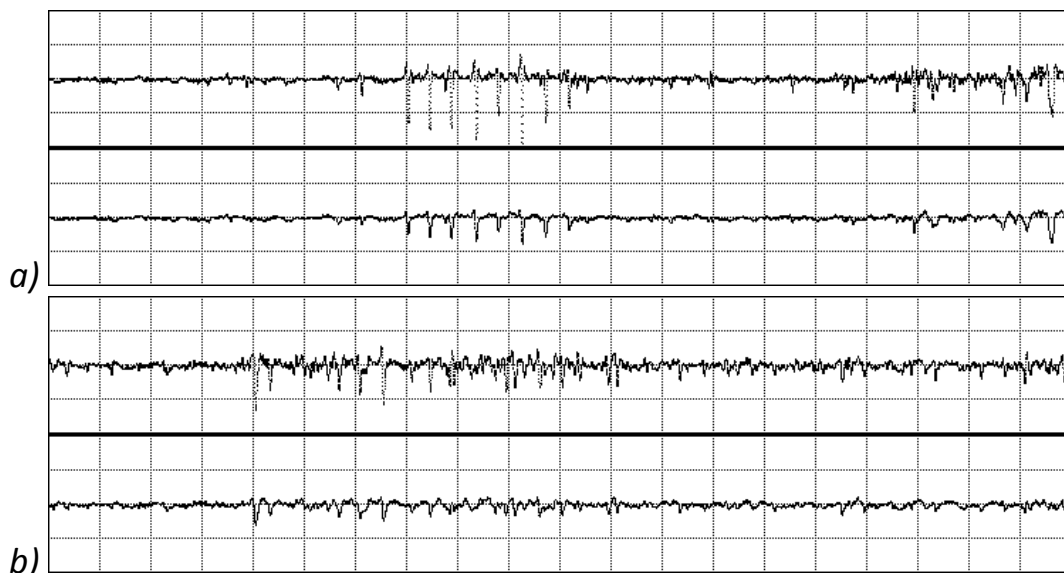


Abbildung 29: Aufzeichnungen von zwei aufeinander folgenden MRT-Prüfungen eines 12 Jahre alten, auf der Trommel aufliegenden Tragseils mit einem Durchmesser von 50 mm, die auf Korrosion hinweisen. Nachdem das Seil abgenommen wurde, wurden weder Drahtbrüche noch ein signifikanter Verlust an metallischem Querschnitt aufgrund von Korrosion festgestellt.

Es sind noch zahlreiche – zum Teil unbeantwortbare – Fragen offen, die einer wissenschaftlichen Untersuchung bedürfen. Einige davon wären:

1. Weshalb enthält das Grundsignal von Litzenspiralseilen oder verschlossenen Spiralseilen anscheinend Kombinationen von Komponenten mit spezifischen Frequenzen, während die einfache magnetische Theorie eine flache Kurve vorhersagt?
2. Welchen Einfluss haben Wirbelströme beim Prüfen von Tragseilen, insbesondere bei Vorliegen von innerer Spannungsrissskorrosion (Rolle von Elektrolyten)?
3. Die meisten MRT-Prüfer haben bereits erlebt, dass MRT-Signale auf eine Reihe von Schäden hinwiesen, die dann zum Ablegen des Seils führten, obwohl nach Öffnung des Seils keine Drahtbrüche festgestellt wurden. Weshalb? Die Empfindlichkeit der MRT-Geräte für Impedanzveränderungen könnte ein Anhaltspunkt für eine angemessene Erklärung sein.

Die umfangreichen Erfahrungen von Wissenschaftlern, wie zum Beispiel in [6] und [9], können für die richtige Beantwortung dieser Fragen relevant sein. Der folgende Abschnitt wendet sich an fortgeschrittene Leser, die an neuen Konzepten für eine bessere Deutung der Signale interessiert sind.

2.9 Fortschrittliche Signalverarbeitung

2.9.1 Künstliche neuronale Netze (KNN)

Ein zentrales Problem bei jeglicher numerischer Suche nach Drahtbrüchen hängt direkt mit der Amplitude der Anzeigen zusammen: bei der Betrachtung von Drahtbrüchen mit kleiner Lücke ist die Amplitude der entsprechenden Anzeige direkt proportional zur Lückenweite. Aus Sicherheitsgründen müssen Drahtbruchmuster mit allen Amplituden bei der Analyse berücksichtigt werden, um Drahtbrüche im Frühstadium zu erkennen, wenn die Lückenweite noch eher gering ist. Die Auslöseschwelle bei der Mustererkennung muss daher knapp über, aber möglichst nahe beim Grundsignal des Seils gewählt werden. Der unmittelbare Nachteil einer niedrigen Auslöseschwelle liegt im Risiko falscher Auslöseereignisse: breite Anzeigen für Drahtbrüche könnten zumindest zweimal vermerkt werden oder es treten Auslöseereignisse an Stellen auf, an denen eine Störung oder ein erhöhtes Rauschen vorliegt.

Für die Lösung dieses Problems gibt es zwei Möglichkeiten: eine manuelle Korrektur oder die Anwendung fortschrittlicher, spezialisierter Entscheidungs- oder Fehlerkorrekturalgorithmen.

Für die Entwicklung von Fehlerkorrekturalgorithmen können sich mehrere Strategien eignen: eine davon ist die Nutzung künstlicher neuronaler Netze (KNN) [10]. Vorteilhaft an künstlichen neuronalen Netzen ist ihre Flexibilität: sie

können komplexe Signale — sogar mit mehr als einer Komponente (verschiedene Spulen, Geschwindigkeitssignale usw.) — verarbeiten, und sie sind insofern "intelligent", als ein Experte Stichproben definieren kann, anhand derer das Netz "lernt", die richtigen Antworten zu geben.

Künstliche neuronale Netze wurden schon erfolgreich für die Fehlerkorrektur nach der Mustererkennung und für die Kategorisierung von Anzeigen angewandt. Das in Abbildung 30 gezeigte Beispiel veranschaulicht den Klassifikationsprozess für eine ziemlich komplexe Situation.

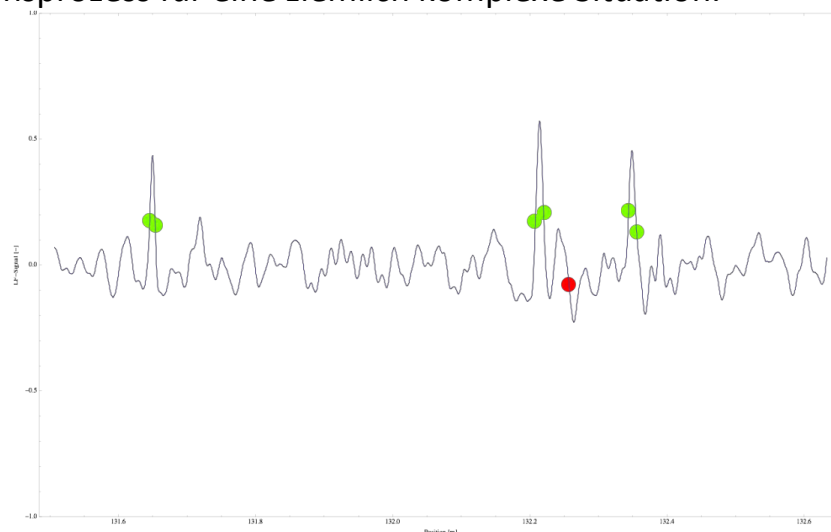


Abbildung 30: Klassifikation von Drahtbrüchen nach der Mustererkennung. Auslösepunkte der Mustererkennung werden mit Punkten markiert. Grüne Punkte werden als Drahtenden erkannt, während rote Punkte für falsche Auslöseereignisse stehen.

Die KNN-Infrastruktur ermöglicht es Fachleuten, eine Wissensbasis aufzubauen und ihr Wissen miteinander zu teilen. Allerdings ist die Definition von Lernstichproben und die Optimierung eines komplexen Netzes ein äußerst zeitaufwendiges Unterfangen. Neuronale Netze werden für gewöhnlich von einem Experten bei der Arbeit "trainiert", wofür eingehende Kenntnisse des zugrundeliegenden Systems erforderlich sind. Ein unzulängliches Training führt direkt zu unbrauchbaren Netzen.

2.9.2 Wavelet-Skalogramm

Die Ermittlung von wesentlichen Merkmalen oder Fehlstellen in MRT-Signalen wird im Allgemeinen von Prüfern manuell im Raum durchgeführt. Ergänzend kann eine breite Palette von Instrumenten aus der Filtertheorie und der Fourier-Analyse [9] genutzt werden. Drahtbruchsignaturen können vom Grundsignal des Seils nicht durch Standardfilter getrennt werden, da sich die jeweiligen Frequenzspektren überschneiden. Eine Alternative ist die Verwendung eines so genannten Wavelet-Skalogramms, das es erlaubt das

Augenblicksspektrum eines MRT-Signals zu extrahieren und somit der ansteigenden Wellenzahl (Ortsfrequenz) in Bezug auf die Lage des Geräts zu folgen.

Die Probleme der MRT-Prüfer mit sich überlagernden oder komplexen Signalen können mit Hilfe von anspruchsvollen Signalverarbeitungsverfahren wie dem Wavelet-Skalogramm zum Teil gelöst werden.

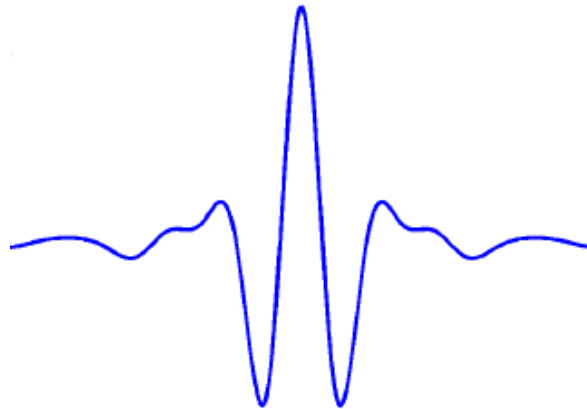


Abbildung 31: Ein Spline-Wavelet, das einer Drahtbruchsignatur sehr ähnlich sieht!

Bei Wavelets handelt es sich um universelle mathematische *Approximatoren*, die so aufgebaut sind, dass sie ein Signal hinsichtlich einer Überlagerung von Elementarsignalen, die kleinen Wellen ähneln (siehe Abbildung 31), dehnen, wodurch die Analyse ihrer Hauptkomponenten ermöglicht wird.

$$W_{\psi}^s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

Die obige Wavelet-Transformation erlaubt es ein MRT-Signal wie mit einem mathematischen Mikroskop in Bezug auf den Raum und die Frequenz zu dehnen. Dadurch kann man die Hauptkomponenten entlang der räumlichen Achse strecken und gleichzeitig den lokalen Spektralgehalt untersuchen. Im Folgenden wird eine optische Analogie verwendet.

Optische Analogie: mathematisches Mikroskop

\mathbf{b}	\longleftrightarrow	Fokus
$\left(\mathbf{a} \Delta t_{\psi}\right)^{-1}$	\longleftrightarrow	Vergrößerungsfaktor
ψ	\longleftrightarrow	Optische Linse

Mit anderen Worten kann eine Drahtbruchsignatur durch Verfolgung ihrer räumlichen Signatur entlang des Seils und gleichzeitig durch Verfolgung der im Drahtbruchsignal enthaltenen Wellennummern beschrieben werden.

In einer zweidimensionalen "Landkarte" — dem Skalogramm — heben sich mehrere kartoffelförmige, farbige Cluster vom weißen Hintergrund ab. Eine Drahtbruchsignatur kann beispielsweise durch einen gipfelförmigen Cluster abgebildet werden, der relevante Informationen über die Art der Fehlstelle und ihre geometrischen Eigenschaften liefert.

Wavelet-Skalogramme sind ein nützliches Hilfsmittel, das es ermöglicht, Drahtbruchereignisse erfolgreicher vom Grundsignal des Seils zu trennen, komplexe MRT-Signale, z. B. Signale mit schlecht getrennten überlagerten Signaturen, besser zu verstehen und die Lücke einer Seilfahstelle zu messen.

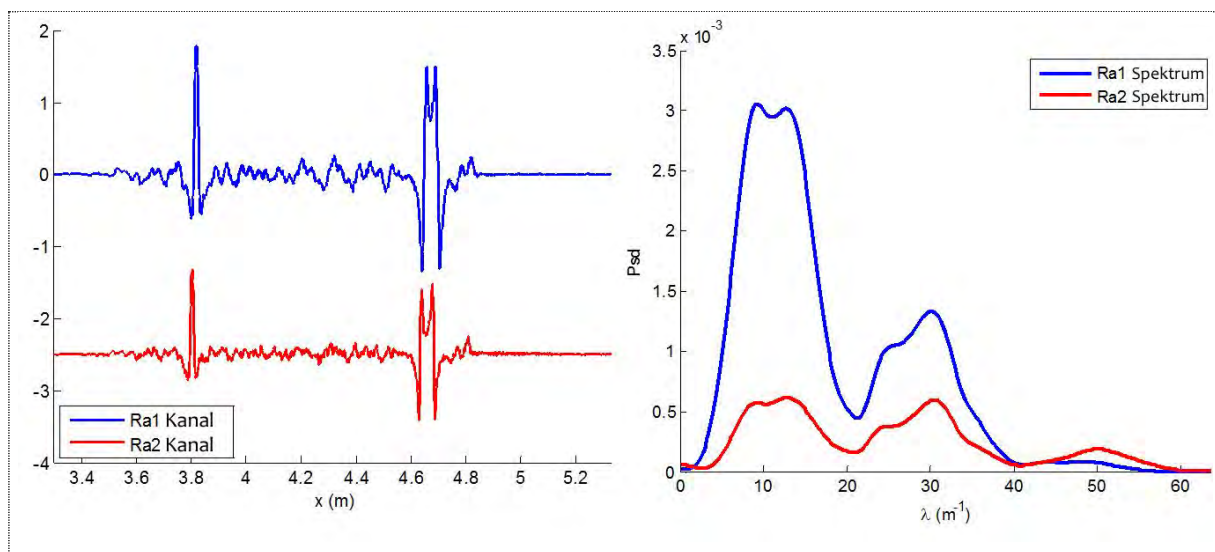


Abbildung 32: MRT-Analyse des Hoffmann-Seils¹:
a) Spulensignale Ra1 und Ra2, b) Leistungsspektren.

¹ Seil aus den Beständen des IFT, Universität Stuttgart.

Die MRT-Signale, die mit dem Seilprüfgerät SMTR 40 beim Musterseil von Hoffmann¹ gemessen wurden, erlauben die Unterscheidung von zwei Referenzfahstellen: ein einzelner schmaler Drahtbruch, gefolgt entweder von einem einzigen Drahtbruch mit weiter Lücke oder einer Abfolge von zwei benachbarten Drahtbrüchen (siehe Abbildung 32).

Im Leistungsspektrum zeigen sich zwei Spitzen mittig um die Wellennummern $\lambda_1 = 12 \text{ m}^{-1}$ und $\lambda_2 = 30 \text{ m}^{-1}$, die möglicherweise Informationen über Drahtbrüche liefern. Die Analyse dieser Informationen bleibt jedoch schwierig, da man nicht sagen kann, ob eine Spitze den ersten oder den zweiten Drahtbruch oder beide beschreibt.

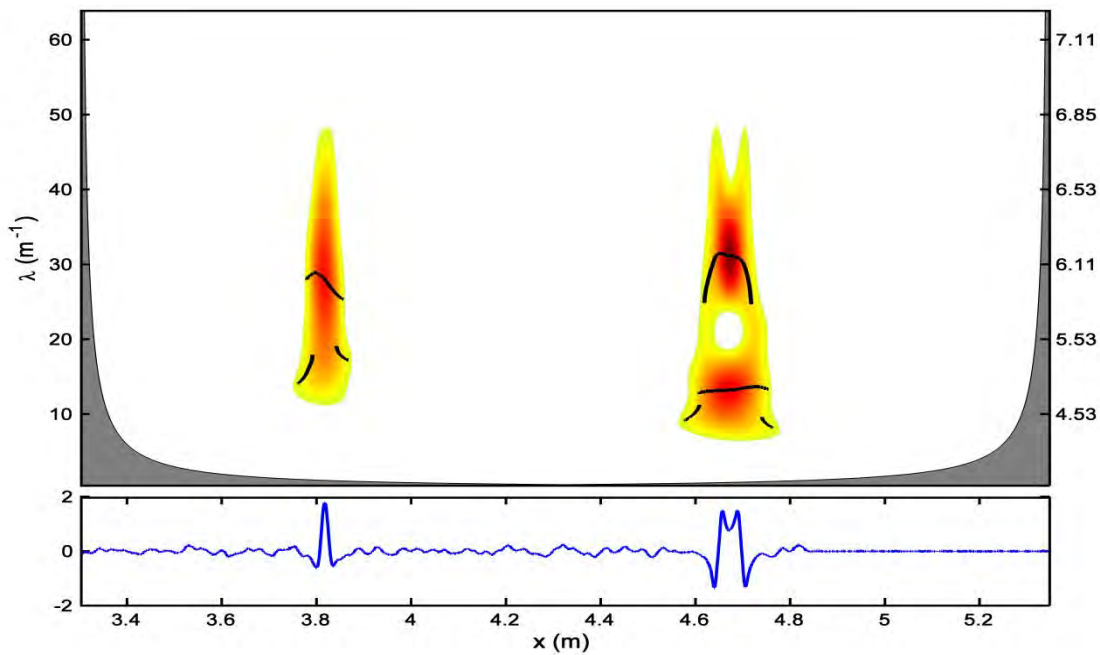


Abbildung 33: Wavelet-Skalogramm der Drahtbruchsignale für das Hoffmann-Seil.

Das Wavelet-Skalogramm aus Abbildung 33 ermöglicht es, dem Spektralgehalt der Drahtbrüche dem Seil entlang zu folgen. Die erste Fehlstelle, deren Spektrum von den Wellennummern $\lambda = 12 \text{ m}^{-1}$ (unten) bis $\lambda = 50 \text{ m}^{-1}$ (oben) reicht, ist typisch für einen einzelnen Drahtbruch, während die zweite Fehlstelle zweigeteilt zu sein scheint.

In Anbetracht dessen, dass nur Cluster, die ausgehend von niedrigen Wellenlängen bis zu hohen Wellenlängen reichen, einem Drahtbruch zugeordnet werden können, kann man mit einem Wavelet-Skalogramm Artefakte von Drahtbruchsignaturen unterscheiden und einzelne Drahtbrüche mit weiter Lücke erkennen. Bei genauerer Untersuchung der Kurve im rechten Cluster kann man die Lückenweite des Drahtbruchs schätzen, indem man den Abstand zwischen dem ansteigenden und dem absteigenden Schenkel misst.

3 Ablegekriterien

Zusammenfassung: Die Ermittlung von Drahtbrüchen und sonstigen Seilschäden erfolgt routinemäßig, um den Verlust an metallischem Querschnitt und folglich die Restzugfestigkeit des Seils zu beurteilen. Die Überlegungen hinter den Ablegekriterien, die auf den Verlust an metallischem Querschnitt in verschiedenen Bezugsängen — kurz, mittel und lang — Bedacht nehmen, werden erläutert, und die damit zusammenhängenden Versagensmechanismen bei Seilen werden vorgestellt.

3.1 Allgemeines

Ablegekriterien hängen immer mit der Beanspruchung des Seils, den gewählten Sicherheitsfaktoren, der Anzahl von Biegewechseln, der Wartung, den Umweltbedingungen usw. zusammen. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sicht- und/oder MRT-Prüfungen sollten die Ablegekriterien nicht überschritten werden.

Bei der Bestimmung des Endes der Nutzungsdauer sollten alle verfügbaren Informationen und Beurteilungen berücksichtigt werden, wie zum Beispiel:

- Schätzung der Betriebsdauer (Ermüdungszyklen),
- Ergebnisse der magnetinduktiven Prüfung (MRT),
- Ergebnisse der Sichtkontrolle,
- geometrische Messungen,
- Ergebnisse anderer optionaler Prüfverfahren, die einen allgemeinen Überblick liefern und bei der Abgabe einer Empfehlung über das Ablegen oder die weitere Verwendung des Seils helfen können.

Das Seil ist grundsätzlich ein sicherheitsrelevanter Bauteil. Um sicherzustellen, dass es für die weitere Nutzung geeignet ist, müssen Grenzen für die Verschlechterung seines Zustands (Ablegekriterien) festgelegt werden.

Diese Grenzen sollten gewährleisten, dass:

- die Bruchfestigkeit nicht zu stark abgenommen hat;
- im Seil keine übermäßigen Strukturveränderungen aufgetreten sind, die zu Folgeproblemen führen können (z. B. Seilentgleisung, fehlerhaftes Einkuppeln).

Mögliche Ursachen für eine Abnahme der Zugfestigkeit des Seils (einschließlich Endverbindungen oder Spleiße) sind:

- Verringerung des metallischen Querschnitts (Drahtbrüche, innerer und äußerer Verschleiß, lockere Drähte, Korrosion).

Anmerkung: Lockere Drähte / Litzen sollten als gebrochen gewertet werden;

- Schädigung der Endbefestigung durch Drahtbrüche oder Korrosion im Bereich der Endbefestigung oder am Eingang in eine Seilhülse sowie inakzeptable Längung;
- Versagen eines Spleißes durch rutschende Einsteckenden, eine Ansammlung von Drahtbrüchen in Knoten oder eine signifikante Verringerung des Durchmessers an Stoßstellen usw.;
- Verringerung der Festigkeit durch Hitze (verursacht durch Blitzschlag, Brand, elektrische Entladung), Kerbwirkung oder Stahlversprödung;
- signifikante Veränderung der Schlaglänge, die in einigen Drahtschichten zu einer im Vergleich zu anderen Schichten erhöhten Belastung führen können.

3.2 Anwendbare Ablegekriterien

Bei jedem Seil – unabhängig von seinem Verwendungszweck – sollten die Ablegekriterien auf einer Einschätzung des Verlusts an metallischem Querschnitt aufgrund von Drahtbrüchen, Verschleiß, lockeren Drähten und Korrosion und auf den Werten beruhen, die in der für das geprüfte Seil relevanten Norm vorgegeben sind.

Der Verlust an metallischem Querschnitt ist für die verschiedenen angegebenen Bezugslängen, für die jeweils eine zulässige Querschnittsverminderung vorgeschrieben ist, zu berechnen. Die Bedeutung der Bezugslänge und der entsprechende maximale Verlust an metallischem Querschnitt geht aus den Werten von Tabelle 4 klar hervor:

Seilkategorie	Bezugslänge	Höchstzulässiger Verlust an metallischem Querschnitt
Verschlossene Spiralseile	200 x d	10 %
	30 x d	8 %
	6 x d	5 %
Litzenseile	500 x d	25 % ⁽¹⁾ , 40 % ⁽²⁾
	30 x d	10 %
	6 x d	6 %

Tabelle 4: Ablegekriterien gemäß EN 12927.

(1) Gemäß der aktuellen Fassung von EN 12927-6. (2) Gemäß Abschnitt 7.3 von prEN 12927.

Interpretation der unterschiedlichen Bezugslängen:

- Die *kurze Bezugslänge* für Litzenseile entspricht ungefähr einer Schlaglänge des Seils oder der doppelten Schlaglänge eines Drahtes in einer Litze ($6 \times d \Rightarrow \leq 1 \times \lambda_{\text{Seil}}$ oder $\sim 2 \times \lambda_{\text{Litze}}$).
- Die *kurze Bezugslänge* für verschlossene Spiraltragseile entspricht ungefähr $2/3$ einer Schlaglänge des Seils ($6 \times d \Rightarrow \sim 2/3 \times \lambda_{\text{Seil}}$).

Bei einem Zugversuch würde das Seil wahrscheinlich an dieser Stelle reißen, wobei die Bruchkraft durch die anteilige Minderung des Querschnitts verringert würde. Dieses Kriterium ist insbesondere für die Beurteilung festgestellter lokaler Schäden gedacht.

- Die *mittlere Bezugslänge* für Litzenseile entspricht ungefähr vier Schlaglängen des Seils und somit zehn Schlaglängen eines Drahtes ($30 \times d \Rightarrow \sim 4 \times \lambda_{\text{Seil}}$ oder $\sim 10 \times \lambda_{\text{Litze}}$).
- Die *mittlere Bezugslänge* für verschlossene Spiraltragseile entspricht ungefähr drei Schlaglängen des Seils ($30 \times d \Rightarrow \sim 3 \times \lambda_{\text{Seil}}$).

Eine Umverteilung der Zuglast zwischen gebrochenen und intakten Drähten kann abhängig von den vorherrschenden Gegebenheiten über eine Bezugslänge von $30 \times d$ nicht angenommen werden. Deshalb sollte davon ausgegangen werden, dass die über diese Länge berechnete Querschnittsverminderung ungefähr der tatsächlichen Verringerung der Bruchfestigkeit entspricht!

- Die *lange Bezugslänge* für Litzenseile entspricht ungefähr 70 Schlaglängen des Seils und somit 170 Schlaglängen eines Drahtes ($500 \times d \Rightarrow \sim 70 \times \lambda_{\text{Seil}}$ oder $\sim 170 \times \lambda_{\text{Litze}}$).
- Die *lange Bezugslänge* für verschlossene Spiraltragseile entspricht ungefähr 20 Schlaglängen des Seils ($200 \times d \Rightarrow \sim 20 \times \lambda_{\text{Seil}}$).

Dadurch dass die Kraft in einem gebrochenen Draht mit der Entfernung von der Bruchstelle durch Reibung wieder zunimmt, kann keine angemessene objektive Korrelation zwischen dem Verlust an metallischem Querschnitt und der Verringerung der Bruchfestigkeit hergestellt werden. Dieses Kriterium ist für die Bewertung des aktuellen Allgemeinzustands eines Seils und die Beurteilung der Entwicklung von Schäden, insbesondere von Ermüdungsschäden, aussagekräftiger.

3.2.1 Bedeutung des höchstzulässigen Verlusts an metallischem Querschnitt

Jeder Bezugslänge ist eine entsprechende zulässige Querschnittsverminderung zugeordnet. Dieser Wert ist die Summe aller Schäden, welche den metallischen Querschnitt des Seils verringern. Neben Drahtbrüchen ist auch der innere (Reibkorrosion) und äußere Verschleiß zu bestimmen und zu quantifizieren.

Somit ist die Summe der gesamten Querschnittsverminderung in der Bezugslänge ungeachtet ihrer Ursachen zu evaluieren.

3.2.2 Weitere Ablegekriterien / Grenzwerte:

Abgesehen von den Kriterien für die Querschnittsverminderung sind weitere Ablegekriterien zu berücksichtigen, für die Beispiele in Tabelle 5 aufgeführt sind:

Anwendung	Kriterien
Allgemeines	Höchstzulässige Anzahl sichtbarer Drahtbrüche bei Seilen, die ausschließlich einer Sichtprüfung unterzogen werden
Litzenseil	Mehr als 50 % der äußeren Drähte einer Litze sind gebrochen Höchstzulässige Querschnittsverminderung bei Litzenseilen Höchstzulässige Abweichung von der Schlaglänge bei Litzenseilen
Verschlossene Spiralseile	Zwei Brüche in benachbarten Z-Drähten innerhalb einer Schlaglänge (einschließlich Fälle, in denen ein einzelner intakter Draht zwischen den beiden gebrochenen Drähten liegt)
Seilendbefestigungen	Ein einziger Drahtbruch oder jegliche Anzeichen sichtbarer Korrosion innerhalb einer Schlaglänge ab der Endbefestigung
Spleiß	Höchstzulässige Querschnittsverminderung an der Spleißstelle (im Bereich der Knoten und Stoßstellen)

Tabelle 5: Beispiele für weitere Ablegekriterien

Jegliche weitere besondere Vorgaben von Behörden, Herstellern usw. sind ebenfalls zu beachten.

3.2.3 Ablegekriterien gemäß ANSI-Norm

Teil des Seils	Bezugslänge	Höchstzulässiger Verlust an metallischem Querschnitt
Gesamtes Seil	6 x d	7,5 %
	30 x d	10 %
Eine Litze	6 x d	25 %

Anm.: Bei der Berechnung der Anzahl von gebrochenen Drähten, die dem angegebenen höchstzulässigen Verlust an metallischem Querschnitt entspricht, wird das Ergebnis zur nächsten ganzen Anzahl von Drähten abgerundet. Anhang B der Norm enthält Beispiele für die Berechnung der zulässigen Anzahl von gebrochenen Drähten.

Tabelle 6: Ablegekriterien gemäß ANSI B77.1-2011.

Die Hauptunterschiede zwischen der EN-Norm und der in Tabelle 6 dargestellten ANSI-Norm sind:

- die ANSI-Norm unterscheidet bei den Ablegekriterien nicht zwischen Litzenseilen und verschlossenen Spiralseilen,
- die ANSI-Norm gibt keine Ablegekriterien für eine hohe Bezugslänge an,
- nach der ANSI-Norm ist der zulässige Verlust an metallischem Querschnitt bei der kurzen Bezugslänge (6xd) höher,
- das Kriterium für eine einzelne Litze wird in der EN-Norm als zusätzliches Ablegekriterium angeführt, wobei die Obergrenze mit 50 % der äußeren Drähte einer Litze angegeben ist.

3.3 Schadensentwicklung

Die Lebensdauer jedes Seils ist begrenzt. Um nach dem Erkennen von relevanten lokalen Schäden oder einer allgemeinen Ermüdung innerhalb der gesamten Seilschleife die Seilsicherheit weiter zu gewährleisten, ist eine Evaluierung der weiteren Schadensentwicklung erforderlich.

3.3.1 Entwicklung von örtlich begrenzten Schäden

Bei örtlich begrenzten Schäden ist das Verstehen der Ursachen eine wesentliche Voraussetzung für die Einschätzung der künftigen Entwicklung. Ohne dieses Wissen ist eine seriöse Beurteilung nicht möglich.

Das Ziel bei örtlich begrenzten Schäden sollte es sein, die Ursache zu beseitigen oder stark zu reduzieren. Nach Wegfall der Ursachen für lokale Schäden kann erwartet werden, dass sie sich mit einer annähernd ähnlichen Geschwindigkeit weiterentwickeln wie Schäden, die auf die allgemeine Ermüdung des Seils zurückgehen.

3.3.1 Entwicklung verteilter Schäden durch Ermüdung

Durch Ermüdung verursachte Seilschäden verlaufen für gewöhnlich "exponentiell". Die zeitlich bedingte Verschlechterung des Seilzustands hängt stark von den Betriebsbedingungen ab, die zusammen mit der erwarteten Lebensdauer des Seils zu betrachten sind, um angemessene MRT-Intervalle zu bestimmen.

Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen drei verschiedene Beispiele für Seile mit einer unterschiedlich rasch verlaufenden Zustandsverschlechterung, wofür es folgende Erklärung geben könnte:

- Fall 1: Seile, die unter normalen Belastungen und Betriebsbedingungen gemäß den Anforderungen der EN-Norm benutzt werden,

Verschlechterung des Seilzustandes

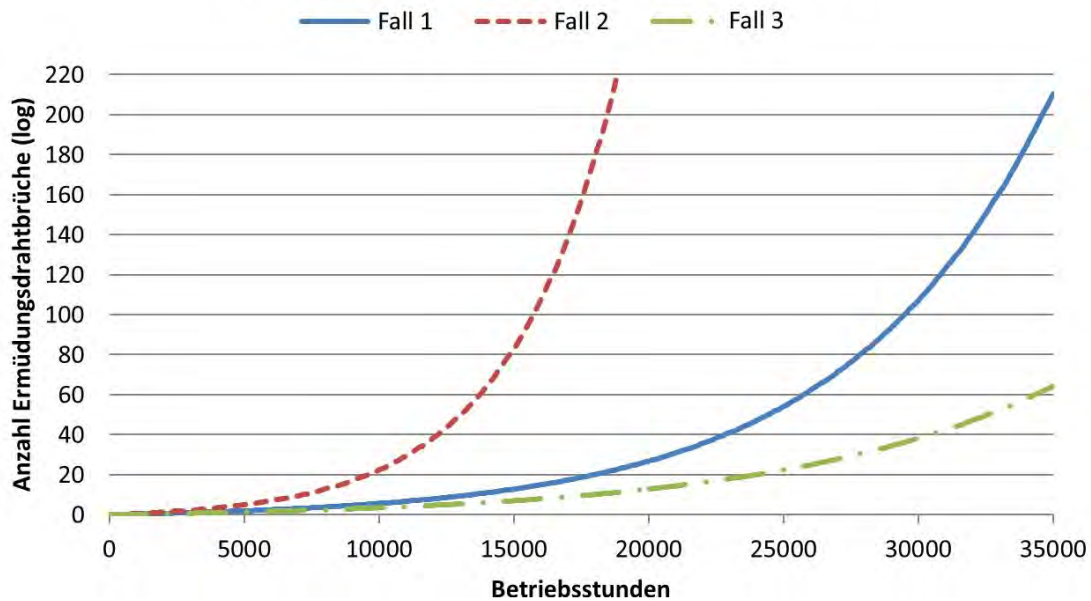


Abbildung 34: Schadensentwicklung (lineare Skalierung).

- Fall 2: Seile, die einer Schädigung unterliegen, zum Beispiel durch Kontakt mit einem unbeweglichen Objekt,
- Fall 3: Seile, die unter optimierten Bedingungen betrieben werden, was der EN-Norm zufolge die Lebensdauer verlängern kann.

Zur Bestimmung der Entwicklung der Anzahl von Drahtbrüchen können mindestens drei verschiedene Zählverfahren verwendet werden. Daher ist stets auf eine Streuung aufgrund von geänderten Randbedingungen Bedacht zu nehmen.

Für die exponentielle Zunahme der Seilschädigung aufgrund von Ermüdung gibt es folgende Gründe:

- Schwache Drähte beginnen zuerst zu brechen, und mit steigender Anzahl von Biegewechseln nimmt auch die Wahrscheinlichkeit eines Bruches bei allen Drähten des Seils zu.
- Die Zuglast wird von gebrochenen zu intakten Drähten umverteilt.
- Durch die immer höhere Belastung beschleunigt sich das Versagen noch intakter Drähte.
- Relevante Bedingungen (z. B. Schmierzustand) ändern sich.

Verschlechterung des Seilzustandes

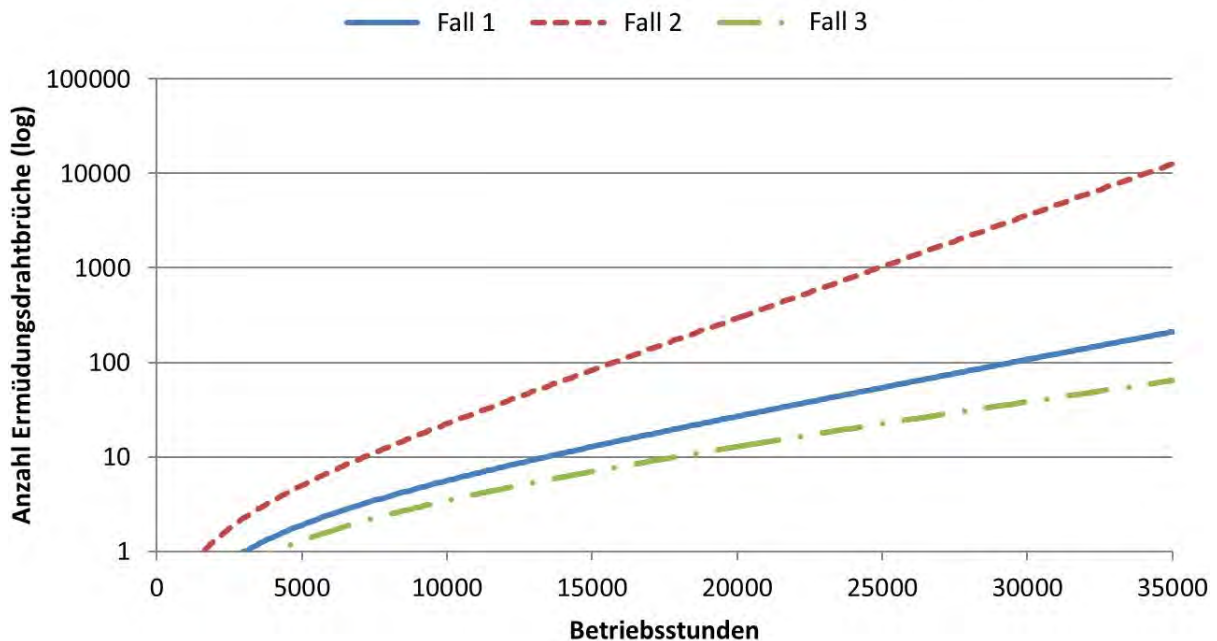


Abbildung 35: Schadensentwicklung (logarithmische Y-Achse).

3.4 Entwicklung der Anzahl von Drahtbrüchen

Wie bereits erwähnt, ist die Lebensdauer jedes Seils begrenzt. Um die Sicherheit des Seils sowie seiner Endbefestigung oder Spleißstelle auf Dauer zu gewährleisten, ist nach Erkennung eines relevanten lokalen Schadens oder einer allgemeinen Ermüdung in der gesamten Seilschleife eine Evaluierung der weiteren Schadensentwicklung, einschließlich der Festlegung künftiger Prüfintervalle, notwendig.

Ziel dabei ist es sicherzustellen, dass die relevanten Ablegekriterien in der Zeit bis zur nächsten Kontrolle (Sicht- oder MRT-Prüfung) nicht überschritten werden.

Daher ist es erforderlich, dass die Seilbenutzer alle Informationen sammeln, die für Bestimmung des richtigen Zeitpunkts für das Ablegen des Seils nötig sind.

3.5 Vorgehen bei Erreichen der Ablegereife

Wenn die Werte für den höchstzulässigen Verlust an metallischem Querschnitt oder andere Ablegekriterien erreicht werden,

- muss das Seil ersetzt werden oder
- hat eine sachkundige Person den Schaden zu beurteilen und über das weitere Vorgehen zu entscheiden. Dieser Seilexperte bestimmt, ob eine Reparatur (Wartung / Überwachung) möglich ist, und erstellt den entsprechenden Terminplan.

3.6 Quellen für Ablegekriterien

Folgende Quellen für Ablegekriterien sind in Betracht zu ziehen:

- nationale Vorschriften (z. B. Regulierungsbehörden)
- Spezifikationen des Herstellers / Lieferanten (Betriebs- und Wartungsanleitungen)
- in Normen festgelegte Anforderungen, wie zum Beispiel:
 - EN 12927
 - ANSI B77.1 - 2011
 - CAN-CSA Z98-07
 - usw.

4 Prüfberichte und Verwaltung der MRT-Daten

Zusammenfassung: *Der Prüfbericht dient als Grundlage für die Wartungsaufgaben (Instandsetzung, Austausch, Sichtprüfung) des Betreibers zwischen zwei MRT-Prüfungen. Er bildet auch die Mindestbezugsbasis für eine MRT-Prüfung, die später von einem anderen Prüfer durchgeführt wird. Im Allgemeinen erhält nur der Betreiber den Prüfbericht (falls keine anderen Vorgaben bestehen). Deshalb müssen die Informationen im Bericht möglichst genau sein. Bestehende Normen präzisieren die Anforderungen an MRT-Prüfberichte, die für ihre Vergleichbarkeit nötig sind, nicht ausreichend. Die in diesem Abschnitt angegebenen ergänzenden Richtlinien sollen diese Lücke schließen.*

Ein Stahldrahtseil ist ein Verschleißteil. Aus diesem Grund reicht die Bestimmung seines Ist-Zustands nicht aus, um die Sicherheit zu gewährleisten. Des Weiteren ist es notwendig, die Vorgeschichte (z. B. Drahtseil-Tagebuch) und die Entwicklung des Seilzustands im Lauf der Zeit zu kennen und die Verwendung des Seils an der konkreten Anlage zu berücksichtigen, um die Prüfintervalle richtig festzulegen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass Ergebnisse verschiedener Prüfstellen vergleichbar sind. Dies kann nur bei Einhaltung und Durchsetzung gewisser Empfehlungen gewährleistet werden. Im Allgemeinen müssen alle Unterlagen über Seilprüfungen während der gesamten Lebensdauer eines Seils aufbewahrt werden. Da dieser Zeitraum sehr lange dauern kann, gelten besondere Empfehlungen, da Berichte, Aufzeichnungen und wichtige Mitteilungen zwischen Stellen, die dasselbe Seil prüfen, ausgetauscht werden müssen.

4.1 Prüfbericht

Die folgenden internationalen Normen enthalten Beispiele für Anforderungen an Prüfbescheinigungen oder -berichte:

- EN 12927
- EN ISO / IEC 17025, Abschnitt 5.10
- EN 1020
- usw.

Diese Bestimmungen decken leider nicht alle Anforderungen ab, die für die Vergleichbarkeit von MRT-Prüfberichten nötig sind.

Um die bisherige Entwicklung des Seilzustands verfolgen zu können, sollte der Prüfbericht folgende Angaben – gereiht nach Wichtigkeit – enthalten:

- Informationen über die Seilkonstruktion: Schlagart und -richtung, Anzahl der Drähte, Drahtdurchmesser, Litzendurchmesser, metallischer Querschnitt aller Drähte, Drahtbeschichtung, metallischer Querschnitt des Seils, Nenndurchmesser und Nenschlaglänge;
- genaue Bezeichnung des geprüften Seils und besonderer Bereiche, z. B. Spleiß.
- Spezifizierung der Magnetisierungseinheit, der Messspule(n), der Prüfgeschwindigkeit, der Testdrähte sowie der Registrierungseinheit und ggf. bei einer digitalen Registrierung die verwendete Softwareversion und deren Einstellwerte. Die Abmessungen von Kalibrierungsdrähten sollten ebenfalls vermerkt werden.
- Prüfbedingungen:
 - Wetterbedingungen und Lichtverhältnisse,
 - Prüfgeschwindigkeit oder Geschwindigkeitsbereich,
 - Seilzustand (sauber, verschmutzt, trocken, geschmiert etc.).
- Ergebnisse der MRT-Analyse mit folgenden Angaben:
 - Anzahl der Anzeigen,
 - Anzahl lockerer Drähte,
 - sonstige vorhandene Schädigungen wie Korrosion, innere und äußere Abnutzung, Blitzschlag usw.,
 - gemessene geometrische Werte (Durchmesser und Schlaglänge) unter Angabe der Position, an der die jeweilige Messung vorgenommen wurde,
 - geschätzter Verlust an metallischem Querschnitt für jede erkannte Schädigung unter Angabe der entsprechenden Bezugslänge.
- Darstellung der Messwerte für den freien Seilbereich und den Spleiß:
 - Freier Seilbereich: Die Position von lokalen Schadstellen in Bezug auf einen geeigneten Fixpunkt ist in der Regel anzugeben, wenn der Verlust an metallischem Querschnitt an dieser Stelle mindestens 50 % des Ablegekriteriums erreicht hat,

- Spleiß:
 - Im Allgemeinen sollte der Spleißbereich unter Angabe der Anzahl von Knoten und Stoßstellen folgendermaßen unterteilt werden:
 - Knoten ($\pm 4 \times d$)
 - Stoßstellen ($\pm 4 \times d$)
 - Bereich der Einstecklitzen
 - mittlerer Spleißbereich (falls vorhanden).
- Rollenkettenbereich:
 - Beschreibung der Methode zur Bestimmung des Seilbereichs, der auf der Rollenkette aufliegt und somit einer Schwellbiegung ausgesetzt ist,
 - Angabe des geprüften Seilbereichs unter Schwellbiegung unter Nennung der angewandten Prüfmethode. Es wird empfohlen, dass eine Begründung angegeben wird, falls einzelne Bereiche nicht geprüft werden konnten. In diesem Fall sind die getroffenen Ausgleichsmaßnahmen und deren Ergebnisse aufzuführen.
- Position und Schadenstyp von Bereichen, die der Betreiber zwischen der aktuellen und der nächsten MRT überwachen muss, sind exakt anzugeben.
- Die Ergebnisse der aktuellen und der letzten Prüfung sollten im Bericht tabellarisch dargestellt werden, um die Entwicklung des Seilzustands aufzuzeigen.
- Der aktuelle Seilzustand sollte beurteilt werden: Dazu gehört insbesondere die Aussage, ob der geprüfte Seilbereich bzw. die geprüften Seilbereiche zum Zeitpunkt der Prüfung den gesetzlichen Anforderungen entsprechen.
- Der Zeitraum bis zur nächsten MRT und ihr Termin ist anzugeben.
- Maßnahmen, die der Betreiber zur Aufrechterhaltung der Sicherheit bis zur nächsten MRT zu ergreifen hat, sind zusammen mit erforderlichen Fristen für die Umsetzung klar darzulegen.

4.2 Verwaltung der MRT-Daten

Es ist erforderlich, dass alle Dokumente und Aufzeichnungen während der Nutzungsdauer des Seils lückenlos rückverfolgbar sind. Es sollte klar festgelegt sein, wer für die Rückverfolgbarkeit und die Aufbewahrung der MRT-Daten verantwortlich ist. Auf Ersuchen muss es jederzeit möglich sein, diese Unterlagen einer anderen Prüfstelle, die anschließende Prüfungen durchführt, zur Verfügung zu stellen. Angesichts der erforderlichen langen Aufbewahrungsfristen ist der Aufbewahrungsort so zu wählen, dass gewährleistet ist, dass die Unterlagen nicht beschädigt werden.

Um für eine zuverlässige Rückverfolgbarkeit des Prüfberichts und der entsprechenden Messdaten zu sorgen, wird empfohlen, dass Prüfstellen ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem betreiben.

5 Risiken und Anforderungen an das Prüfpersonal

Zusammenfassung: Bei der Durchführung von MRT-Prüfungen besteht potentiell das Risiko, dass es zu Verletzungen, Sachschäden und einem Scheitern der Prüfung selbst kommt. Die Risiken in Verbindung mit der magnetischen Seilprüfung werden in diesem Abschnitt behandelt.

Der Übersichtlichkeit halber werden die Risiken folgendermaßen thematisch unterteilt:

- Risiken für das Nichterkennen von Fehlstellen im Seil,
- Risiken für Sach- oder Personenschäden während der MRT.

Die Aufstellung potentieller Risiken erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Erzielung eines aussagekräftigen Ergebnisses bei MRT-Prüfungen sind die Qualifikationen des Prüfers. Daher werden auch Anforderungen an die Kenntnisse und Fertigkeiten des Prüfpersonals aufgelistet.

5.1 Risiken für das Nichterkennen von Fehlstellen im Seil

- Fehlerhafte Konstruktion des MRT-Geräts selbst, so dass es die für die Prüfung erforderlichen Aufgaben nicht ausführen kann;
- ungenügende Empfindlichkeit des Geräts: beispielsweise kann die Stärke der Magneten im Gerät nach mechanischen Schlägen abnehmen oder sogar ganz verloren gehen;
- Fehlfunktion des MRT-Geräts während der Prüfung: elektromagnetische Felder in der Prüfumgebung können Störungen bei den gemessenen MRT-Signalen hervorrufen;
- Unvermögen des Personals, die Prüfung ordnungsgemäß durchzuführen;
- Auslassungen oder Ungenauigkeiten im Prüfbericht;
- Fehlerhafte Kalibrierung des MRT-Systems;
- Prüfbedingungen (z. B. Geschwindigkeit, Seildurchmesser), die der Prüfausrüstung nicht entsprechen,
- Durchführung der MRT nicht über die gesamte Seillänge.

5.2 Risiken für Sach- oder Personenschäden während der MRT

Die meisten im Zusammenhang mit Personal und Ausrüstung häufig auftretenden Probleme, die zu Sach- oder Personenschäden führen können, ergeben sich aus einer oder einer Kombination der folgenden Ursachen:

- ungenügend geschultes Prüfpersonal;
- ungenügende körperliche Leistungsfähigkeit des Personals;
- Kontakt des Personals mit:
 - dem laufenden Seil,
 - sich bewegenden oder rotierenden Teilen;
- Kontakt der Prüfausrüstung mit:
 - Stützen,
 - Fahrzeugen oder Klemmen,
 - Bauwerken,
 - Seil- oder Litzenschäden,
 - abstehenden Profildrähten,
 - mehreren gebrochenen Runddrähten,
 - abstehenden oder gebrochenen Profildrähten oder -litzen,
 - deformierten oder gebrochenen Spleißlitzen oder Knoten,
 - ungeeignete Geometrie des MRT-Magneten in Bezug auf das Seil und den Spleiß;
- Loslösen des MRT-Magneten aufgrund ungenügender Sicherung;
- Fehlfunktion der MRT-Ausrüstung (Öffnungs- oder Hebefunktion);
- Kommunikationsprobleme zwischen den Beteiligten,
- menschliches Versagen;
- Defekt im Steuerungssystem der Anlage;
- zu wenig Platz zur Montage der MRT-Ausrüstung;
- ungenügende Arbeitsplattform für den Prüfer;
- unsachgemäße Handhabung des Geräts bei Montage oder Demontage aufgrund einer starken Magnetisierungskraft.

5.3 Anforderungen an das MRT-Prüfpersonal

Gibt es keine ausdrücklichen Vorschriften, kann EN 12927 als Beispiel für die Aufgaben des MRT-Prüfpersonals herangezogen werden. Für die eigenständige Durchführung von MRT-Prüfungen muss ein Prüfer folgende Tätigkeiten ausführen können und über folgende Kenntnisse und Fertigkeiten verfügen:

Physische Fähigkeiten:

- Aufbau des Prüfgeräts,
- Durchführung der Prüfungen.

Grundkenntnisse:

Das gesamte Prüfpersonal benötigt umfassende Kenntnisse über Seilbahnen, ihre besonderen Gefahren und die Sicherheitsanweisungen für Arbeiten an Seilbahnen.

Kenntnisse über Seile und besondere Fertigkeiten:

- Kenntnisse über den Typ und die Funktionsweise der Seilbahn, an der das zu prüfende Seil eingebaut ist,
- Fähigkeit zur Durchführung von unmittelbaren Sichtkontrollen an zweifelhaften Bereichen des Seils und von Messungen wie Seildurchmesser, Schlaglänge usw.
- Fähigkeit zur Durchführung von unmittelbaren Sichtkontrollen an einem Spleiß,
- Fähigkeit, den Typ und die Funktion von Seilen zu erkennen, und Verständnis der Art und Weise ihrer Zustandsverschlechterung,
- Fähigkeit zum Verständnis der Spleißmethode, der Verkürzung des Spleißes und des Instandsetzungsverfahrens.

Kenntnisse über die Prüfausrüstung, das Prüfverfahren und die Beurteilung von Fehlstellen in einem Seil

- Fähigkeit zur Aufzeichnung der Prüfergebnisse,
- Verständnis der Anwendungsgrenzen des Prüfverfahrens,
- Verständnis der MRT-Normen und -Spezifikationen sowie Fähigkeit, diese in praktische Prüfabläufe umzusetzen, die an die tatsächlichen Arbeitsbedingungen angepasst sind,
- Fähigkeit zur Erstellung schriftlicher Prüfanweisungen,
- Kenntnisse darüber, wie der Prüfungsaufbau vor Ort durchgeführt und das Gerät kalibriert wird.

Fachkenntnisse für die Beurteilung von Fehlstellen im Seil

- Fähigkeit zur Einstufung der Ergebnisse anhand von schriftlichen Kriterien,
- kurze und bündige Darstellung der Ergebnisse
- umfassende Erfahrungen und Ausbildung in der MRT-Durchführung,
- Wahl der besten Technik für das verwendete Prüfverfahren

- Fähigkeit zur Interpretation und Bewertung der Ergebnisse, einschließlich von Empfehlungen für künftige Prüfintervalle, im Hinblick auf bestehende Normen, Vorschriften und Spezifikationen,
- Fähigkeit, Empfehlungen für die Durchführungen weiterer zerstörungsfreier Prüfungen abzugeben,
- allgemeine Vertrautheit mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren.

Fachkenntnisse für die Vorbereitung einer MRT-Prüfung

Personen, die an der MRT-Prüfung eines Seils mitwirken, sollten Folgendes durchgehen:

- das "anerkannte MRT-Prüfverfahren" der Seilbahn (falls vorhanden);
- Konstruktion und Vorgeschichte des Seils;
- Längsschnitt und Bauten der Seilbahn;
- Bedienung und Protokoll für die Steuerungs- und Kommunikationssysteme der Seilbahn sowie die Rettungsverfahren für ihre eigene Sicherheit.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Kommen wir nun zurück zur den eingangs gestellten Fragen darüber, was man von der MRT hält, ob man sie versteht und inwieweit man ihr vertrauen kann. Überlegen Sie nun, wie weit Sie selbst zu einer der beiden gegensätzlichen Antworten, die aufgeführt wurden, tendieren. Da Sie nun — hoffentlich — mehr über die MRT wissen, wäre die nächste wichtige Frage:

Sind Sie versucht zu sagen, dass sie selbst eigenständig eine MRT durchführen können?

6.1 Wirksam, aber nicht einfach!

Über viele Jahre hinweg wurde die Zuverlässigkeit des magnetinduktiven Seilprüfungsverfahrens für das Erkennen von Zustandsverschlechterungen und das Beurteilen ihrer Weiterentwicklung nachgewiesen. Allerdings muss diese Art der Seilprüfung durch gut ausgebildete MRT-Prüfer durchgeführt werden. Da das Seil bei der MRT ein wesentliches Element ist, ist es immer Teil der Prüfeinrichtung: daher kann man MRT-Geräte nicht einfach anhand ihrer inneren Konstruktionsmerkmale direkt miteinander vergleichen. Somit ist es von grundlegender Bedeutung, dass man ein MRT-System als ein Wirksamkeitsdreieck aus "Seil", "Gerät" und "Prüfer" betrachtet. MRT-Prüfer müssen lernen, Drahtbrüche oder andere Fehlstellen anhand der MRT-Signale zu erkennen, und sich laufend weiterbilden, um ihr Wissen bei der Prüfung von

Bezugsseilen mit bekannten Fehlstellen zu verbessern. Da ein Drahtbruch in einem Bereich liegen kann, in dem auch verschiedene andere Seilschäden vorhanden sind, kann die Deutung einer Drahtbruchsignatur im MRT-Signal nicht auf der Hand liegen und erfordert eingehende praktische Erfahrung. Dennoch kann man davon ausgehen, dass das Auftreten von Spitzen jeglicher Form die zuverlässige physikalische Grundlage der Seilprüfung mittels MRT bildet. Deshalb sind MRT-Prüfungen zusammen mit einer visuellen Kontrolle vorzunehmen. Bisherige MRT-Aufzeichnungen sind oft sehr hilfreich bei der Erstellung einer genauen Diagnose, da man so die Entwicklung der Seilschädigung von Prüfung zu Prüfung verfolgen kann.

6.2 Probleme und die wichtigsten bekannten Grenzen?

MRT-Konstrukteure, Prüfer und Seilbahnbetreiber sprechen eine Reihe von Fragen und Probleme an:

- Einige Grenzen des Verfahrens ergeben sich direkt aus den Grundsätzen der Magnetinduktion und der Konstruktion der Geräte, wie beispielsweise die Schwierigkeit einer ausreichend hohen und konstanten Magnetisierung im Messspulenbereich, um den Einfluss von Streufeldern oder eine Selbstinduktion in den Spulen zu minimieren. Zu beachten ist, dass MRT-Geräte den hier aufgeführten Empfehlungen entsprechen.
- Andere Probleme wiederum hängen mit den Prüfbedingungen an Seilbahnen zusammen. Beispiele dafür sind:
 - die Verwendung von Spulen mit unpassendem Durchmesser für das zu prüfende Seil;
 - eine ungeeignete Prüfgeschwindigkeit, welche die Verteilung des magnetischen Flusses im Messbereich verzerren kann;
 - Nähe zu metallischem Material, wie im Bereich von Stützen, Sätteln oder Rollenketten, was das MRT-Signal voraussichtlich stört.
- Die Drahtbruchanalyse ist keine einfache Aufgabe, was es mit sich bringt, dass bei einer Öffnung des Seils nach dem Ablegen eventuell weniger Fehlstellen gefunden werden als erwartet. Das Grundsignal des Seils kann beispielsweise selten sauber von Drahtbruchsignaturen getrennt werden, was das MRT-Signal verkompliziert. Eine Drahtbruchsignatur kann als einzelner, doppelter oder mehrfacher Drahtbruch erfasst werden, wenn sich mehrere Spitzen überlagern. Derartige Probleme erlangen entscheidende Bedeutung bei Seilen gegen Ende der Nutzungsdauer, die alt, abgenutzt und korrodiert sind.

Die MRT-Prüfung hat Grenzen hinsichtlich der Erkennung von Schäden im Seilinneren, z. B. bei Spannungsrissskorrosion. Ein Beispiel dafür, das der gesamten Branche zu denken geben sollte, ist der Schadensfall an der Schilthornbahn [\[11\]](#). In so schwierigen Fällen können zusätzliche

Untersuchungen für die Beurteilung des tatsächlichen Zustands eines Seils nützlich sein. Einige Innovationen, die diese Lücke schließen könnten, werden nachstehend vorgestellt.

6.3 Künftige Arbeiten und Innovationen

Derzeit sind innovative Konzepte in der Erprobung, die zum Beispiel durch eine Verbesserung des Funktionsumfangs von MRT-Geräten oder neuartige Signalverarbeitungstools zur Erleichterung der Arbeit der MRT-Prüfer beitragen können.

- Hochauflösendes 3D-MRT-Gerät

Das Problem der MRT-Analyse mit mehrfachen, schlecht getrennten Drahtbruchsignaturen kann in manchen Fällen durch den Einsatz eines hochauflösenden 3D-MRT-Geräts gelöst werden, das theoretisch mehrere Drahtbrüche, die über den Seilquerschnitt verteilt sind, unterscheiden kann. Der Prototyp dieses Geräts könnte der Vorläufer der nächsten Generation von MRT-Geräten sein.

- Neuronale Netze als Klassifikatoren

Eine in der Schweiz entwickelte Strategie der MRT-Auswertung verwendet neuronale Netze zur Erkennung von in MRT-Signalen eingebetteten Anomalien [10]. Bei diesem Verfahren lernt eine neuronale Netzarchitektur anhand von bekannten MRT-Mustern, die beispielsweise einzelnen oder doppelten Drahtbrüchen entsprechen. Nach Stabilisierung der Lernphase wird eine auf der Mustererkennung basierende Suchstrategie festgelegt, mit der das neuronale Netz ähnliche Muster in den Seilprüfungssignalen erkennen kann. Dieser Ansatz erweist sich sowohl als konsistent als auch als robust.

- Wavelet-Analyse

Der Wavelet-Ansatz, der mit einem mathematischen Mikroskop vergleichbar ist, kann alternativ oder ergänzend zu den aktuellen Methoden für die Auswertung von MRT-Signalen angewendet werden. Dabei wird ein MRT-Signal nach Mustern durchsucht, die Drahtbruchsignaturen ähneln. Diese Innovation scheint solide und viel versprechend zu sein, zum Beispiel bei der Unterscheidung von schlecht abgegrenzten Drahtbruchhäufungen und bei der Gewinnung von Informationen über Abnutzung und Korrosion aus dem Grundsignal des Seils.

Unter der Bezeichnung "Wirelet" wird zurzeit ein Wavelet-Rahmen mit spezifischen Wavelet-Mustern für Drahtbrüche entwickelt, der MRT-Prüfer bei der Analyse komplexer MRT-Signale unterstützen soll.

6.4 MRT in Kürze

Die magnetinduktive Seilprüfung kann mit einer aus drei Gliedern bestehenden Kette verglichen werden:

- Gerät:** Das MRT-Gerät und seine Sensoren müssen eine Konstruktion hoher Qualität aufweisen, um für optimale Bedingungen bei der Seilprüfung zu sorgen...
- Prüfungsdurchführung:** Seilprüfungen sind von einem ausgebildeten Prüfer unter optimalen Betriebsbedingungen vorzunehmen...
- Signalauswertung:** MRT-Signale sind von einem sachkundigen Prüfer vorzugsweise mit Unterstützung durch spezielle Signalverarbeitungstools und ergänzt durch eine visuelle Kontrolle von allfälligen MRT-Anomalien zu analysieren.

In den meisten Fällen ist die Effektivität der MRT garantiert, wenn diese drei Glieder der Kette gut ineinander greifen. Zu beachten ist allerdings, dass die magnetinduktive Seilprüfung, die insbesondere zur Beurteilung des inneren Zustands von Seilen dient, durch regelmäßige Sichtprüfungen ergänzt werden muss.

7 Literaturverzeichnis

- [1] C. E. McCann und R. Colson, "Device for the determination of area loss of wire ropes and cables and similar objects". Deutsches Patent Nr. 175895 KI 42b Gr. 10, 1906.
- [2] R. Woernle und H. Müller, "Meßspule für mit Gleichstrom betriebene Vorrichtungen zur magnetischen Prüfung (Feststellung von mechanischen Zerstörungen) von Stahldrahtseilen". Deutsches Patent Nr. 758730, 1937.
- [3] R. V. Baud, "Die Kontrolle von Stahldrahtseilen mittels magnetischer Prüfgeraete". *Schweizer Bergbahnen, Oberseeverlage Siebnen.*, 1959.
- [4] J. Stachurski, R. Martyna und E. Kalwa, "Use of Hall-effect-sensors for detection of different rope faults", *OIPEEC Bulletin*, S. 139-147, 1981.
- [5] C. Chaplin, I. Ridge und A. Tytko, "Measurement of abrasive wear on wire ropes using non-destructive electro-magnetic inspection", *OIPEEC Bulletin*, Band 78, Nr. 679, S. 67-80, 1999.
- [6] M. Dohm, "An evaluation of magnetic rope testing instrument defect detection capabilities, particularly in respect of low rotation, multi-layer rope constructions", *OIPEEC Bulletin*, Band 78, Nr. 681, S. 37-62, 1999.
- [7] J. Nussbaum, Zur Erkennbarkeit von Drahtbrüchen in Drahtseilen durch Analyse des magnetischen Störstellenfeldes, Dissertation, IFT, Universität Stuttgart, 1999.
- [8] A. Haller, "Neue Erkenntnisse über die Seilquerschnittsmessungen / New Methods of Measuring the Cross-Sections of Ropes", *ISR Internationale Seilbahn-Rundschau, Heft 3*, Bohmann Verlag Wien, 1984.
- [9] A. Tytko und T. Golosinski, "Magnetic rope examinations: definition of rope lay length through LF signal analysis," *OIPEEC Bulletin*, Band 76, Nr. 669, S. 11-20, 1998.
- [10] S. Messmer, IWT Institut für Werkstofftechnologie AG, "Today's Wire Rope Testing", Wallisellen, 2012.
- [11] G. Oplatka, G. Piskoty und M. Zraggen, "Track rope incident at the Schilthornbahn," *OIPEEC Bulletin*, Nr. 782, S. 181-186, 2006.

8 Glossar

Eisenrückschluss: Metallteil, der den magnetischen Kreis schließt.

Grundsignal (des Seils): Allgemeines magnetinduktives Signal, das vom aktuellen Zustand und der Geometrie des geprüften Seils bestimmt wird. Signale für erkennbare Fehlstellen (wie Drahtbrüche) heben sich vom Grundsignal ab.

Hochauflösende Prüfung: Ein Messkopf mit kreisförmig angeordneten Hall-Effekt-Sensoren, mit dem die Lage einer Fehlstelle erkannt werden kann und der insbesondere für die Prüfung von Tragseilen in Seilabschnitten eingesetzt wird, die vor einer Verschiebung des Seils im Bereich von Stützensätteln lagen.

Streufeld: Teil des Magnetfelds, den das Seil und insbesondere Fehlstellen in den Umgebungsraum streuen. Diese Feldkomponente wird mittels Streuflussspulen oder Hall-Effekt-Sensoren erfasst.

Streuflussspule: Messspule zur — in der Regel radialen — Erfassung von Veränderungen des Streuflusses durch eine Bezugsfläche.

Magnetriegel: Rohr, das als robustes Gehäuse für das spröde Magnetmaterial und die Eisenrückschlüsse dient.

Metallischer Seilquerschnitt: Summe der gesamten Querschnittsfläche der ferritischen Drähte im Seil.

Magnetische Flussdichte: Stärke der magnetischen Erregung, die in einem Prüfgerät erreicht wird, was den höchsten metallischen Seilquerschnitt bestimmt, der untersucht werden kann.

MRT-Gerät: oder Seilprüfgerät oder -instrument, Messkopf...

MRT-Prüfer / -Prüfpersonal: Verantwortliche(r) für die MRT-Prüfung, Drahtbruchanalyse und Prüfberichte.

Relative Signaldichte: Statistisches Diagramm der relativen Verteilung der Signalamplituden über die gesamte Messlänge.

Prüfkalibrierung: Kalibrierungstest des MRT-Geräts, bei dem der Bereich eines für diesen Zweck an der Seiloberfläche angebrachten Markierungsdrahts mit der in den Messspulen erzeugten Spannungsamplitude korreliert wird.

Messkopf: MRT-Vorrichtung, einschließlich Hauptrahmen, Magneten, Eisenrückschluss, Sensoren und Führungssystem.

Wavelet: (wörtlich "kleine Welle") ein Typ mathematischer Funktionen, der in der modernen Signalverarbeitungstheorie vielfach eingesetzt wird, um die Zeit-Frequenz-Zerlegung eines Signals zu jedem Zeitpunkt zu ermöglichen.