II Die magnetinduktive Streuflußprüfung an Drahtseilen

II.1 Physikalische Grundlagen der magnetinduktiven Streuflußmessung

Die elektromagnetische Streuflußprüfung von Drahtseilen nutzt die stark unterschiedlichen Permeabilitäten der Stahldrähte und der umgebenden Luft bzw. der Fasereinlage und des Schmierstoffs. Da es keinen magnetischen Isolator gibt, bildet sich in jedem magnetischen Kreis neben dem gewollten Weg des Nutzflusses auch ein Streufluß aus. Wird der Nutzfluß jedoch durch ein hochpermeables Medium, wie beispielsweise Stahl, geführt, kann der Streufluß in der umgebenden Luft in diesem Bereich vernachlässigt werden, da für den magnetischen Widerstand gilt:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A} \qquad \text{Gl. 1}$$

und sich mit

$$\mu_{Draht} >> \mu_{Luft} \qquad \text{Gl. 2}$$

$$R_{m,Draht} << R_{m,Luft} \qquad \text{Gl. 3}$$

ergibt.

Betrachtet man einen magnetischen Kreis, bestehend aus einem Permanentmagne-

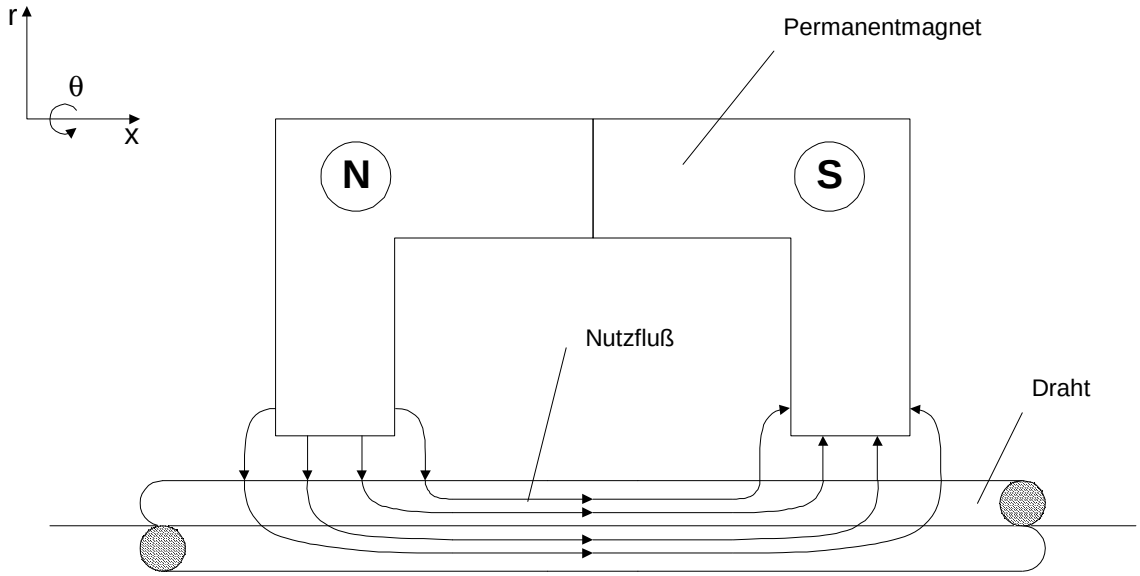

Abbildung II. 1

Magnetischer Kreis, gebildet aus einem Permanentmagneten und einem ungeschädigten Stahldraht

ten und einem aus einem einzigen Draht bestehenden Drahtseil nach Abbildung II. 1, so wird aufgrund des wesentlich geringeren magnetischen Widerstandes des Drahtes (Gl. 3) der magnetische Fluß in diesem Bereich nur durch den Stahl geführt. Wird dieses hochpermeable Medium nun jedoch durch einen Luftspalt unterbrochen, muß der Streufluß wieder in die Betrachtungen einbezogen werden. Ist der Luftspalt relativ klein (Abbildung II. 2), kann der gesamte Nutzfluß annähernd über diese Lücke fließen [9]. Für den Streufaktor gilt dann näherungsweise:

$$\sigma = \frac{\Phi_{Nutz} + \Phi_S}{\Phi_{Nutz}} \approx 1 \qquad \text{Gl. 4}$$

Bei zunehmender Luftspaltlänge nimmt der Streufluß ausgehend von der Mantelflä-

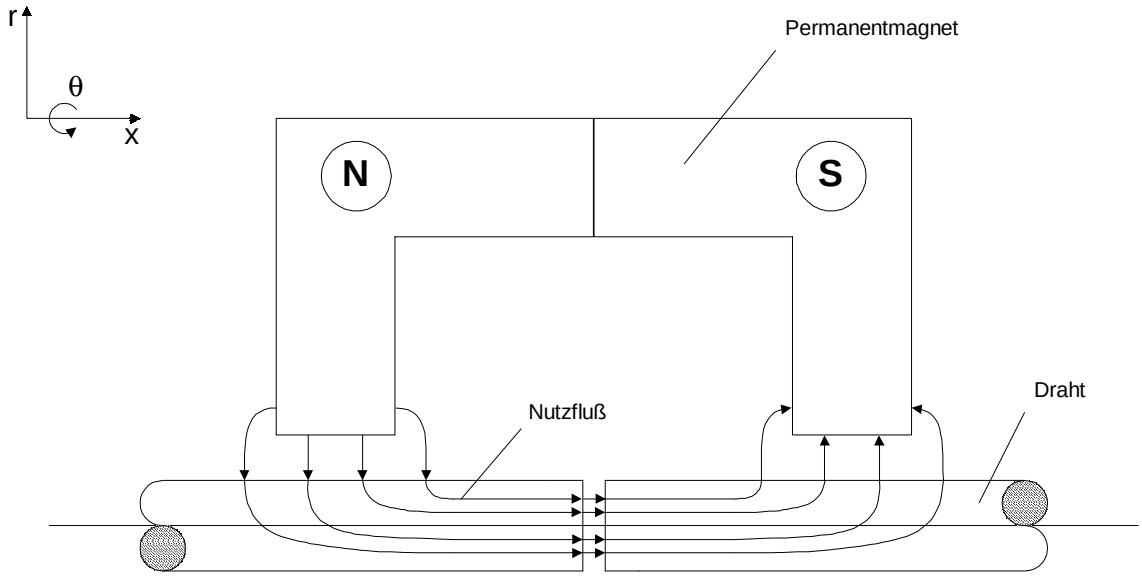

Abbildung II. 2

Magnetischer Kreis, bestehend aus einem Permanentmagneten und einem Stahldraht, unterbrochen durch einen Luftspalt sehr geringer Längenausdehnung

che der beiden Pole des hochpermeablen Mediums weiter zu, so daß nahezu der gesamte Nutzfluß im Bereich der Bruchstelle in die Umgebung ausweicht; der Streufaktor σ strebt gegen „unendlich“ (Abbildung II. 3).

Für die weitere Betrachtung des magnetischen Streufeldes im Bruchbereich des

Drahtes wird ein drahtgebundenes Zylinderkoordinatensystem *x, r, Θ* nach Abbildung II. 5 eingeführt. Dieses ist für den vorliegenden Fall sinnvoll, da vorausgesetzt werden kann, daß das magnetisierte Seilstück ausreichend lang ist und sich somit in seiner Mitte ein homogenes Magnetfeld parallel zur Längsachse des idealisierten

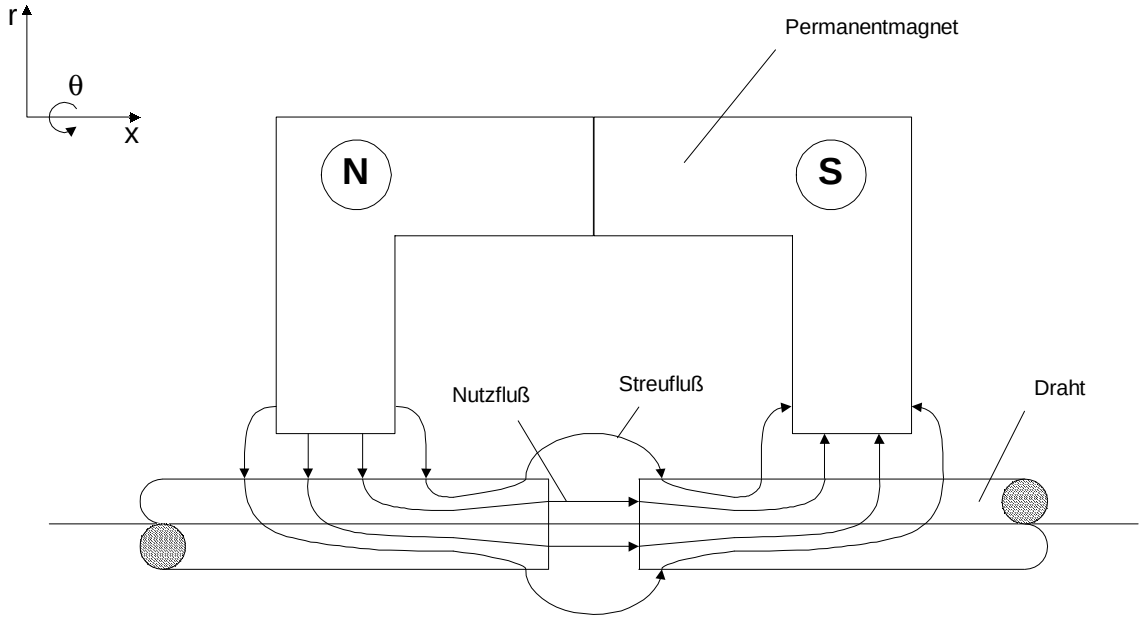

Abbildung II. 3

Magnetischer Kreis, gebildet aus einem Permanentmagneten und einem Stahldraht, unterbrochen von einem Luftspalt endlicher Ausdehnung

Seils einstellt.

Die weiterführenden Überlegungen beschränken sich auf die Grenzfläche zwischen Draht und Luft im Bereich des Bruches (Abbildung II. 4): Die magnetische Flußdichte an dieser Grenzfläche zweier Materialien unterschiedlicher Permeabilität läßt sich beschreiben durch:

$$\boldsymbol{B}_{Draht,r} = \boldsymbol{B}_{Luft,r} \qquad \text{Gl. 5}$$

$$\boldsymbol{B}_{Draht,ax} = \frac{\mu_{Draht}}{\mu_{Luft}} \cdot \boldsymbol{B}_{Luft,ax} \Rightarrow \boldsymbol{B}_{Draht,ax} >> \boldsymbol{B}_{Luft,ax} \qquad \text{Gl. 6}$$

$$\frac{\tan \alpha_{Luft}}{\tan \alpha_{Draht}} = \frac{\mu_{Draht}}{\mu_{Luft}} \Rightarrow \tan \alpha_{Luft} \approx 0, \textit{für } \pi/2 > \alpha_{Draht} \geq 0 \qquad \text{Gl. 7}$$

Bei dem zunächst betrachteten, unbeschädigten Draht verlaufen die Feldlinien parallel zu seiner Längsachse (Abbildung II. 1). Da die magnetische Flußdichte im Draht

keine Radialkomponente aufweist, $B_{Draht,r} = 0$, hat das magnetische Feld in der umgebenden Luft nur eine Axialkomponente, deren Betrag verglichen mit der im Draht vorliegenden, $B_{Draht,ax}$, nach Gl. 6 sehr viel kleiner ist .

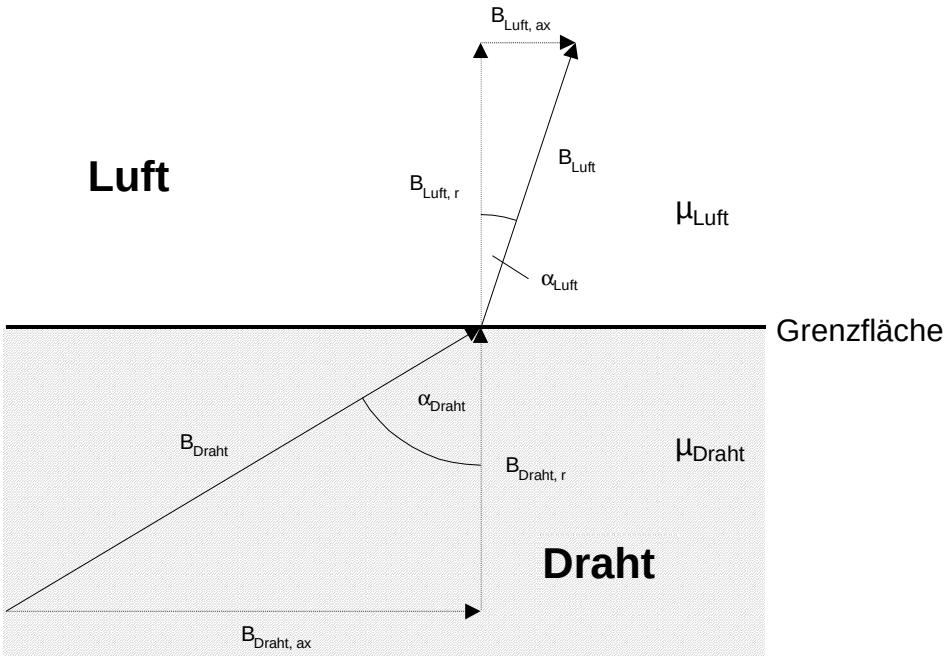

Abbildung II. 4

Verhalten der magnetischen Flußdichte beim Übergang von einem hochpermeablen Medium (Draht) in ein niedrigpermeables (Luft)

Man denke sich nun eine Meßspule in Form einer einfachen Leiterschleife auf dem konstanten Radius $r=r_{LS}$ mit der somit zylindrischen Mantelfläche A_{LS} mit der Geschwindigkeit v parallel zur Seillängsachse über den Draht geführt (Abbildung II. 5).
In dieser Schleife wird die Spannung

$$U_{ind} = -w \cdot \frac{d\Phi_{Luft}}{dt} \qquad \text{Gl. 8}$$

mit:

$$\Phi_{Luft} = \int_{A_{LS}} \vec{B}_{Luft} d\vec{A} \qquad \text{Gl. 9}$$

bzw. im vorliegendem Fall:

$$\Phi_{Luft} = \int_{A_{LS}} B_{Luft,r} dA \qquad \text{Gl. 10}$$

induziert.

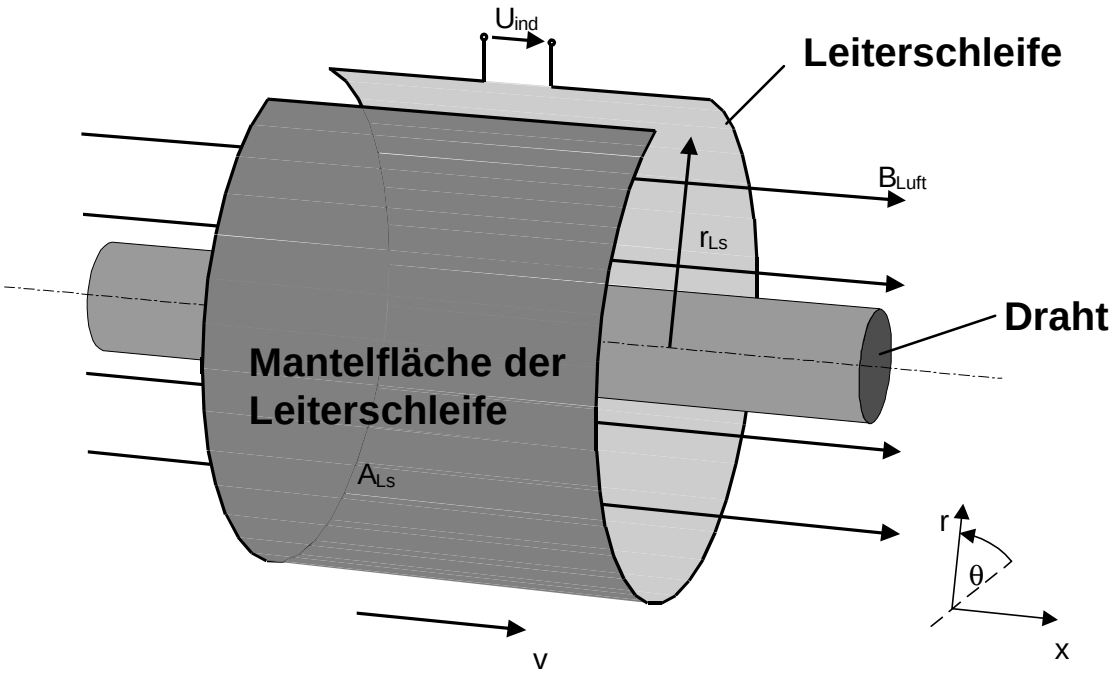

Abbildung II. 5

Radialspule im magnetischen Feld um einen Draht

Da der magnetische Fluß aufgrund seiner Kopplung mit dem Draht hier als eine Funktion des Weges definiert werden kann, gilt [3]:

$$U_{ind} = -w \cdot \frac{d\Phi_{Luft}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = -w \cdot \frac{d\Phi_{Luft}}{dx} \cdot v \qquad \text{Gl. 11}$$

Da im bisher betrachteten Fall des unbeschädigten Drahtes $B_{Luft,r} = 0$ ist, wird in der Leiterschleife keine Spannung induziert.

Betrachtet man nun einen Draht mit einer Bruchstelle, liegt in diesem Bereich des magnetischen Kreises ein Luftspalt mit zwei Grenzflächen Draht/Luft vor. Nach Gl. 7 treten dort, an der Oberfläche der Bruchkanten, die Feldlinien nahezu senkrecht in die umgebende Luft aus (Abbildung II. 3) [9]. Da der gesamte Fluß in die Luft austreten muß, nimmt die Radialkomponente $B_{Luft,r}$ der magnetischen Flußdichte in der Umgebung des Drahtbruches endliche Werte an.
In der Radialleiterschleife wird nun beim Passieren dieses Bruches eine Spannung gemäß Gl. 11 induziert. Für einen kleinen Luftspalt zeigt Abbildung II. 6 den Verlauf der induzierten Spannung.

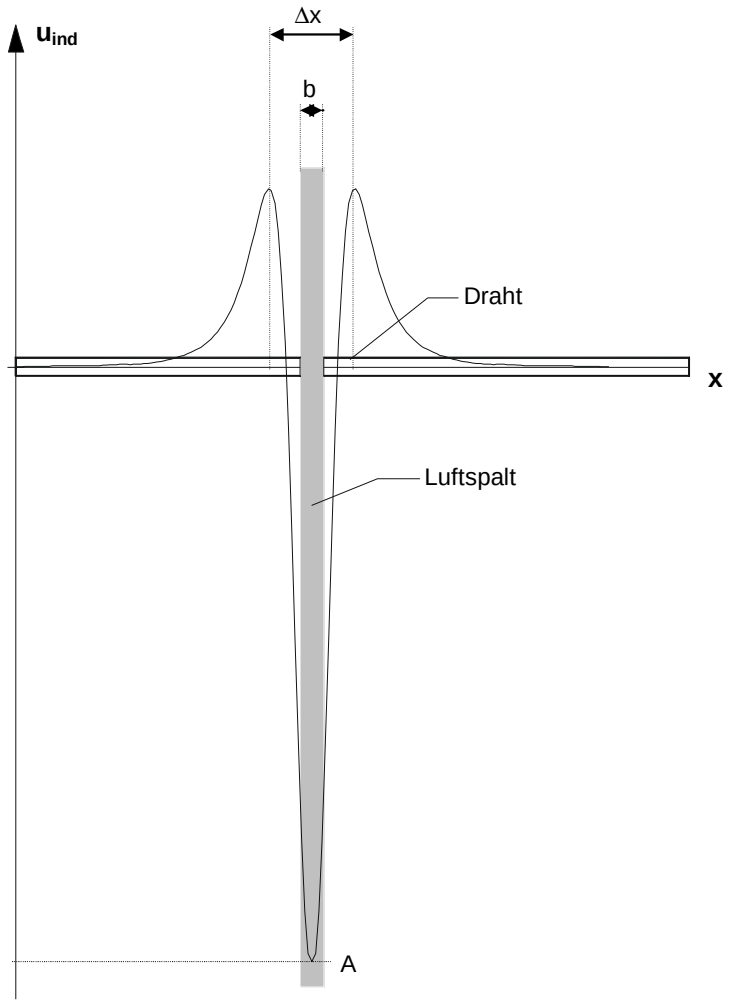

Abbildung II. 6

Verlauf der in einer Radialspule induzierten Spannung beim Überfahren eines Drahtbruches mit geringem Bruchendenabstand

II.2 Das Nutzsignal

Als Nutzsignal wird der durch ein von einem Drahtbruch hervorgerufenen Streufeld in der Meßspule induzierte Spannungsverlauf über den Seilweg bezeichnet (Abbildung II. 6). Um eine Vorhersage des Signalverlaufes machen zu können, ist eine genauere Kenntnis des Streufeldes notwendig. Da eine geschlossene Lösung hierfür bisher noch nicht gefunden wurde, behilft man sich für die Beschreibung der magnetischen Vorgänge an der Bruchstelle mit unterschiedlichen Modellen der Einzel- und Dipoltheorie [10].

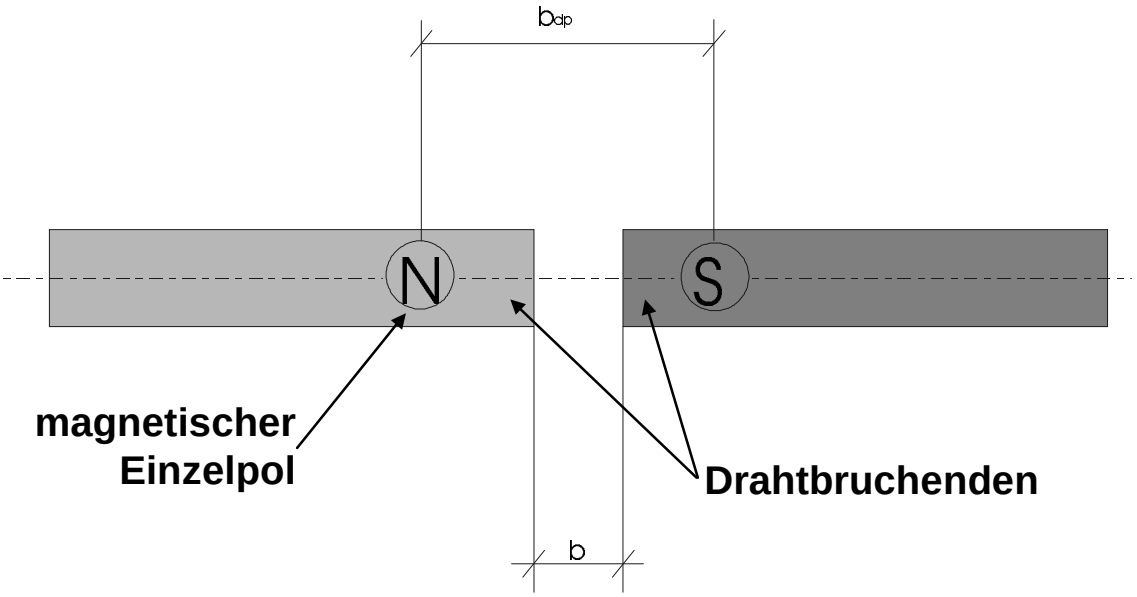

Abbildung II. 7

Dipolmodell für einen Drahtbruch

Am verbreitetsten ist die magnetische Dipoltheorie, bei der die Bruchstelle durch zwei gegensinnige magnetische Punktquellen, angeordnet in den beiden Bruchenden, angenähert wird. Der Abstand dieser Punktquellen ist stets größer als der Bruchendenabstand (Abbildung II. 7). Von diesen Punktquellen breiten sich jeweils kugelförmige, magnetische Felder in den Raum aus. Deren Überlagerung liefert dann das gesuchte von einem Drahtbruch verursachte Streufeld [10].

Ausgehend von diesem Modell ist bei gegebener Magnetisierung und Spulengeometrie die durch einen Drahtbruch hervorgerufene Signalform der induzierten Spannung abhängig von den Parametern:

- Relativgeschwindigkeit zwischen Seil und Spule
- Windungszahl der Meßspule
- Exzentrizität des Bruches bezüglich der Spulenlängsachse
- Bruchendenabstand
- Drahtquerschnitt

Unbetrachtet bleiben bei diesem Modell die Querschnittsform des Drahtes sowie Winkel zur Längsachse und Beschaffenheit der Bruchfläche.

II.2.1 Einfluß der Relativgeschwindigkeit und der Windungszahl der Spule

Nach Gl. 11 sind sowohl die Relativgeschwindigkeit zwischen Seil und Spule als auch die Windungszahl der Spule proportional zur in der Meßspule induzierten

Spannung. Während die Windungszahl eine Konstante für die verwendete Spule ist und ihr Einfluß daher einfach unterdrückt werden kann, variiert die Relativgeschwindigkeit zwischen Seil und Meßspule üblicherweise bei einer Messung. Um dies zu berücksichtigen, ist eine parallel durchgeführte Geschwindigkeitsmessung erforderlich. Daraus läßt sich die bezogene, geschwindigkeitsunabhängige induzierte Spannung errechnen:

$$u_{ind} = U_{ind} / v \qquad \text{Gl.12}$$

II. 2.2 Einfluß der Bruchparameter

Die drei Parameter Bruchexzentrizität, Bruchendenabstand und Drahtquerschnitt charakterisieren den Bruch und seine Lage im Seil.

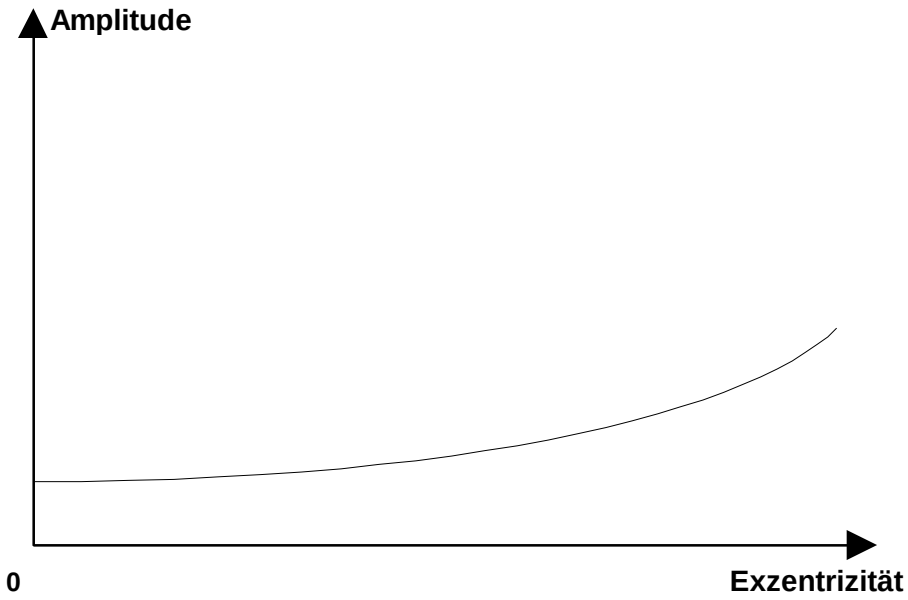

Abbildung II. 8

Abhängigkeit der Amplitude der induzierten Spannung von der Exzentrizität des Bruches zur Seillängsachse

Die Exzentrizität beschreibt den Abstand der Bruchstelle von der Spulenlängsachse in *r*-Richtung und damit die Tiefenlage des Bruches im Seil. Äußere und innere Drahtbrüche unterscheiden sich in ihrer Tiefenlage. Mit zunehmender Exzentrizität

werden die Beträge der Amplitude größer, da mit Annäherung der Meßspule an den Ausgangsort des Streufeldes immer mehr Feldlinien die Mantelfläche der Spule durchdringen (Abbildung II. 8).

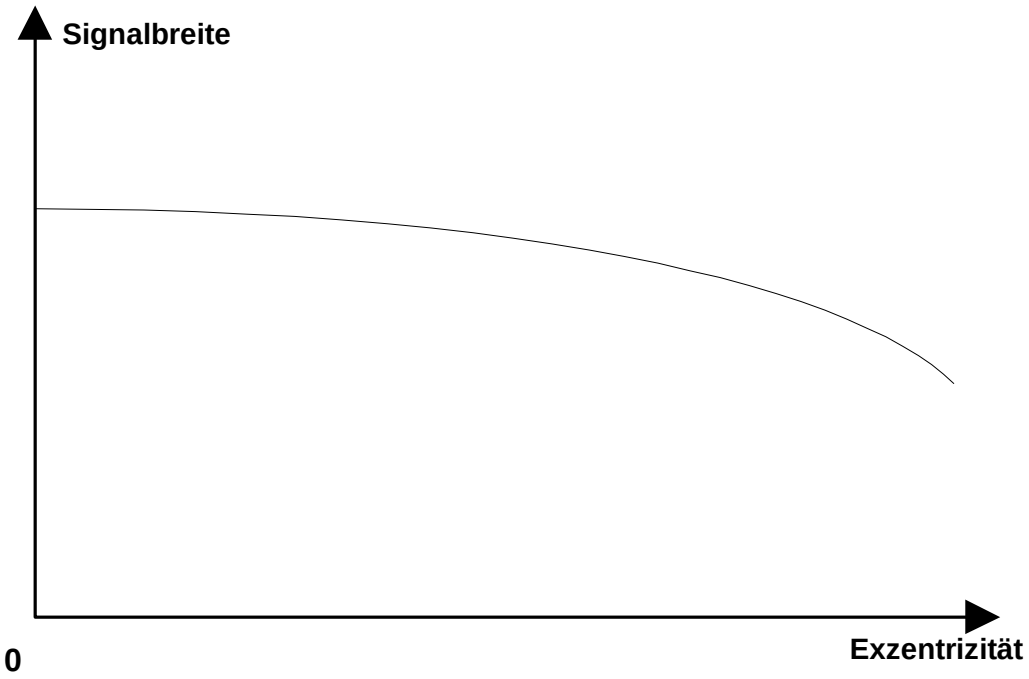

Abbildung II. 9

Abhängigkeit der Signalbreite von der Exzentrizität des Bruches zur Seillängsachse

Die Signalbreite Δx (Abbildung II. 6) nimmt aufgrund der Ausbreitung des Feldes im Raum ausgehend von der Störquelle bzw. den beiden gedachten Einzelpolen entsprechend ab (Abbildung II. 9) und erreicht bei größter Annäherung an die Störquelle den Abstand der gedachten Einzelpole. Die Signalform bleibt bei der Änderung der Exzentrizität erhalten.

Der Bruchendenabstand b ist bei gegebener Exzentrizität entscheidend für die Ausbildung der Signalform. Bei einem sehr großem Bruchendenabstand liegen die beiden Felder der Einzelpole ungestört vor. Bei Annäherung der beiden Enden zueinander tritt eine Überlagerung der beiden Felder auf und es entstehen im Verlauf der Verringerung des Bruchendenabstandes unterschiedliche Feldformen. Entsprechendes gilt für den Signalverlauf der induzierten Spannung: Liegt ein sehr großer Bruchendenabstand ($b \rightarrow \infty$) vor, so ergeben sich, hervorgerufen durch die Einzelfelder, die beiden spiegelbildlichen Signalformen nach Abbildung II. 10, Grundmuster 1.

Verringert man den Abstand weiter, überlagern sich die beiden Signalformen entsprechend Abbildung II. 10, Grundmuster 3, zu den Signalverläufen für geringere Bruchweiten [1].

Es lassen sich somit drei typische Grundmuster des Signalverlaufes unterscheiden (Abbildung II. 10):

1. Grundmuster 1 bei großem Bruchendenabstand; zwei spiegelbildliche Einzelsignale, gekennzeichnet jeweils durch ein Minimum und ein Maximum;
2. Grundmuster 2 bei mittlerem Bruchendenabstand; gekennzeichnet durch ein zentrales negatives Maximum, zwei seitliche Minima und Maxima;
3. Grundmuster 3 bei geringem Bruchendenabstand; gekennzeichnet durch ein zentrales Minimum und zwei seitliche Maxima.

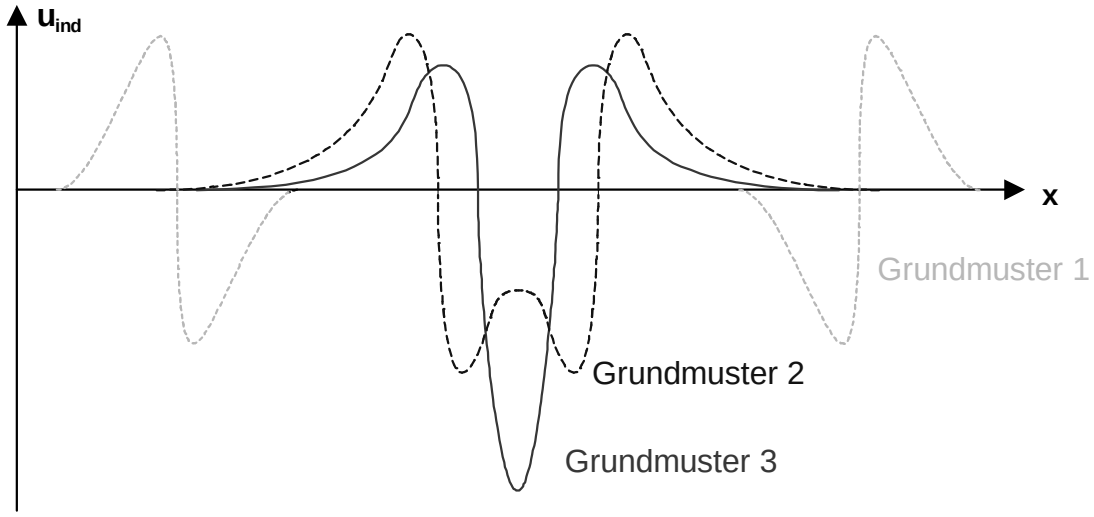

Abbildung II. 10

Einfluß des Bruchendenabstandes b auf die Ausbildung der induzierten Spannung

Grundmuster 1:	$b_1 \rightarrow \infty$
Grundmuster 2:	$b_3 > b_2 > b_1$
Grundmuster 3:	$b_3 \rightarrow 0$

Die Bildung der Grundmuster 2 und 3 aus den beiden Hälften des Grundmusters 1 (Abbildung II. 10) läßt sich bis zu einem unteren Grenzbruchendenabstand b_{krit} anhand von Messungen nachweisen (Abbildung II. 11). Bei Verringerung des Bruchendenabstandes unterhalb b_{krit} nimmt die Signalbreite Δx nur noch geringfügig ab, die Amplituden der Extrema werden weiterhin kleiner bis sie bei $b=0$ verschwinden. Die charakteristische Form des Signalmusters bleibt dabei erhalten [1].

Unterhalb b_{krit} gilt das Modell der beiden Einzelpole somit nicht mehr. Vielmehr bietet sich an Stelle dessen das Modell eines Dipols, dessen Polstärke bei annähernd konstantem Polabstand mit Verringerung der Bruchweite abnimmt.

Der Grenzbruchendenabstand b_{krit} liegt bei ca. 5 mm [1]. Somit liegt der Großteil der an Drahtseilen auftretenden realen Drahtbrüche unterhalb dieses Wertes.
Der Einfluß des Drahtquerschnitts und damit der Größe der Bruchendenfläche auf die Signalform beschränkt sich auf die Amplitude. Messungen zeigen eine direkte Proportionalität zwischen Größe der Querschnittsfläche des gebrochenen Drahtes und der Amplitude [1,7].

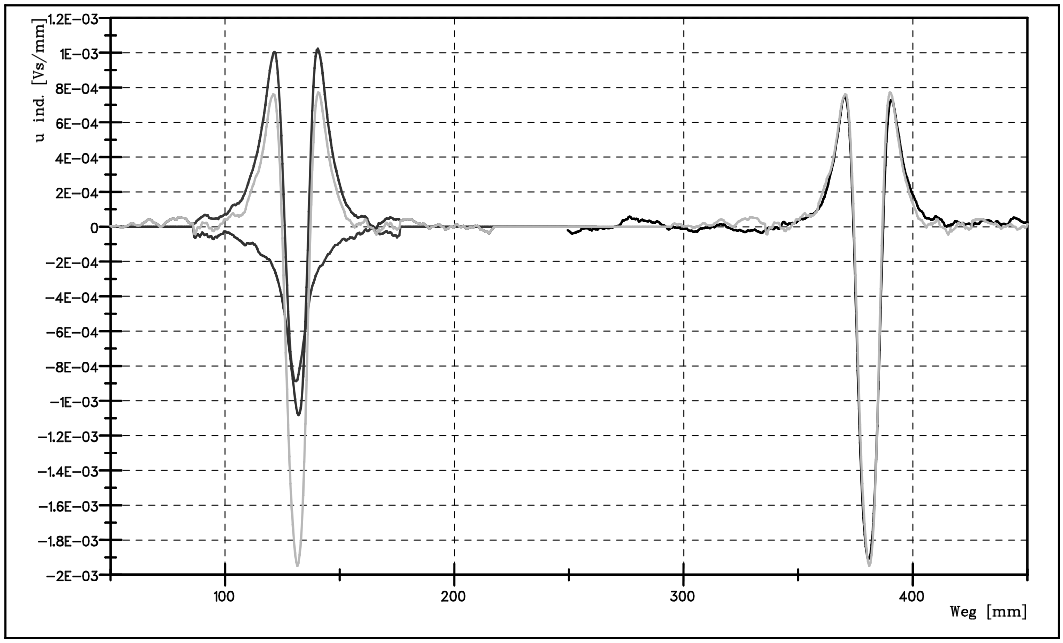

Abbildung II. 11

Ermittlung des Signalverlaufs eines Drahtbruches durch Überlagerung der Signalverläufe zweier Einzelpole und Vergleich mit dem entsprechenden gemessenen Signalverlauf

Links:	*Signalverlauf der Einzelpole (rot, violett)* *Summensignal (grün)*
Rechts:	*Summensignal (grün)* *Gemessenes Signal (schwarz)*

Die genannten Einflüsse auf das Nutzsignal gelten analog für alle ähnlichen Querschnittsfehler, wie z. B. Kerben an Kreuzungsstellen zweier Drähte oder Korrosionsnarben. Aufgrund des geringen Querschnittsverlustes induzieren sie auch nur eine geringe Spannung. Da diese Fehler üblicherweise in großer Häufung auftreten, erhöhen sie vielmehr den Rauschpegel der induzierten Spannung in erheblichem Maße und sind als Einzelsignal nicht erkennbar.

II.3 Der Rauschpegel

Das idealisierte, aus einem Draht bestehende Seil induziert im ungeschädigten Zustand in der Meßspule keine Spannung. Überfährt man ein reales, ebenfalls ungeschädigten Seils mit dieser Meßspule findet man im Gegensatz dazu aber eine deutliche Meßwechselspannung. Ursache dafür sind die Unterschiede im Aufbau beider Probanden:
Im realen Seil liegen die Drähte im Gegensatz zum idealisierten Modell nicht parallel zur Seillängsachse sondern in Folge der Verseilung auf einer im Raum gekrümmten Bahn. Der magnetische Fluß breitet sich aufgrund des wesentlich geringeren magnetischen Widerstands wiederum hauptsächlich in dem hochpermeablen Stahldraht aus. Parallel dazu bilden sich in der umgebenden Luft Feldlinien, die im Gegensatz zum idealisierten Modell eine meßbare radiale Komponente haben.

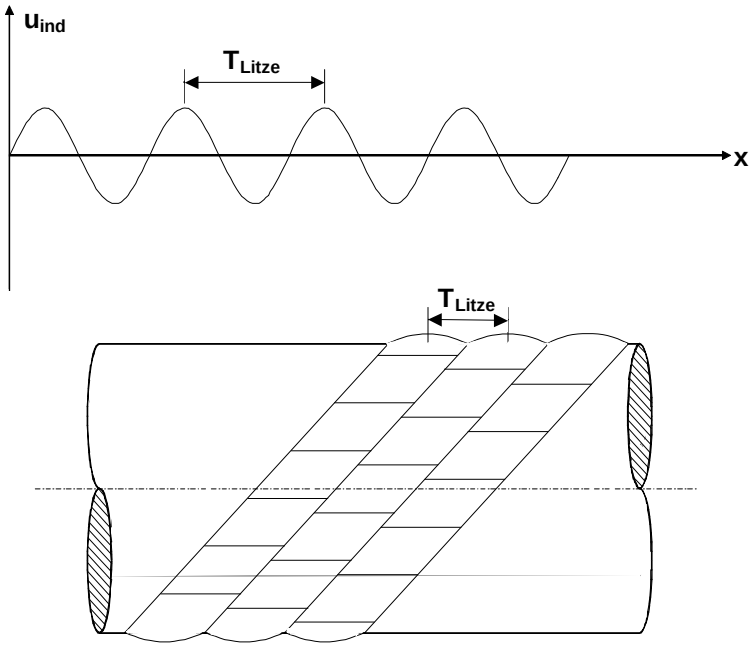

Abbildung II. 12

Signalpegel aus dem Seilaufbau

Da die Raumkurve der Drähte aufgrund der Verseilung eine periodische Struktur hat, induziert die Radialkomponente des begleitenden Feldes in der Meßspule eine periodische Wechselspannung. Meyer [10] konnte diesen Feldverlauf mit einer speziellen Spule nachweisen.

Dominante Periodenlänge ist bei Litzenseilen der Abstand zweier benachbarter Litzen, der sich aus der Schlaglänge und der Litzenanzahl ergibt (Abbildung II. 13, Abbildung II. 14):

$$T_{Litze} = \frac{S}{n_{Litzen}} \qquad \text{Gl.13}$$

Dieser aus dem Aufbau des Seils resultierende Anteil des Rauschpegels überlagert sich ein unregelmäßiger Anteil, der durch stochastisch verteilte Schadenshäufungen, Korrosionsnarben, Kerben an den Drahtüberkreuzungen oder Verschleißspuren (s. **II. 2.2**), hervorgerufen wird.

Führt man eine Frequenzanalyse der aufgezeichneten induzierten Spannung eines neuen, ungeschädigten Seiles durch, zeigt sich ein typisches Bild (Abbildung II. 13): Der stochachstische Anteil ist relativ gering; die Frequenz des Litzenabstandes ist deutlich erkennbar.

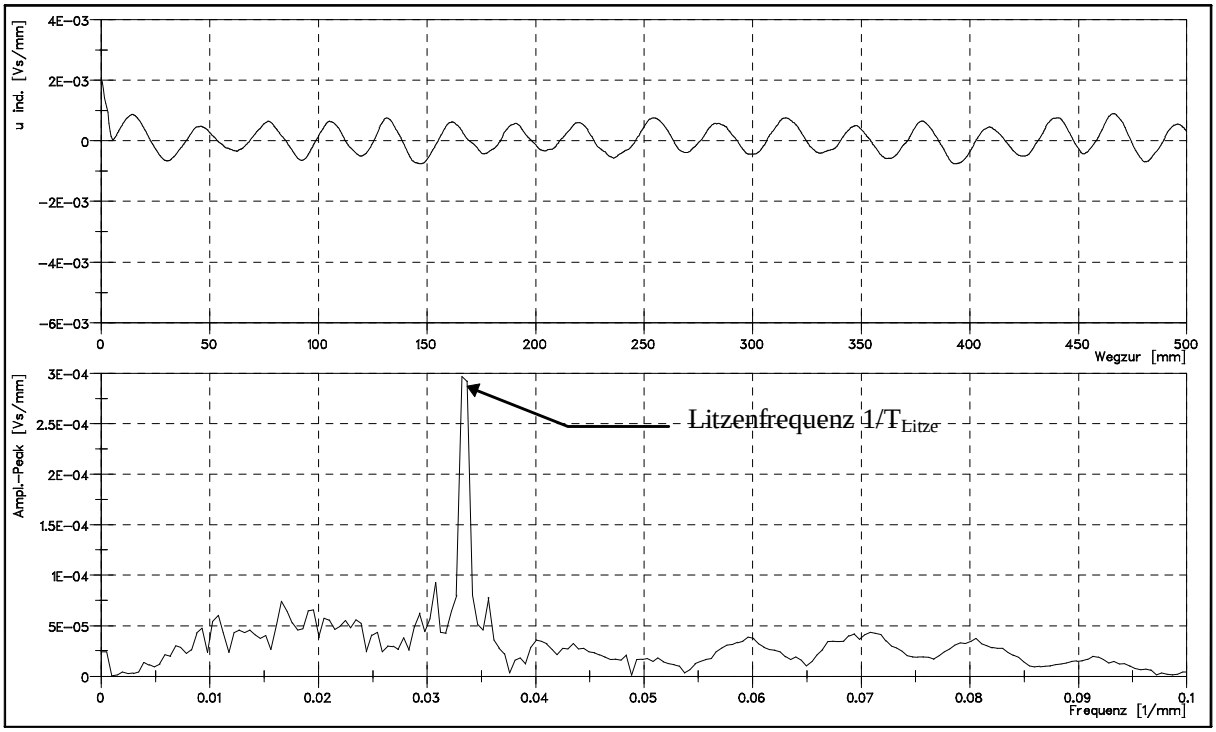

Abbildung II. 13

Signalzusammensetzung bei Messung an einem neuen Seil
Oben: aufgezeichnete induzierte Spannung
Unten: Amplitudenspektrum der induzierten Spannung

Mit längerer Aufliegezeit des Seils und damit mit sich erhöhendem Schädigungsgrad verändert sich der Rauschpegel des gemessenen Signalverlaufs in der Art, daß der

stochastische Anteil zunimmt und die Frequenz, die sich aus dem Litzenabstand ergibt, in den Hintergrund tritt (Abbildung II. 14).

Die Dominanz der Frequenz des durch den Litzenabstand hervorgerufenen Signalanteils läßt sich zur Ermittlung der Schlaglänge nutzen [2]. Aus der dem maximalen Amplitudenpeak zugehörigen Frequenz läßt sich die Schlaglänge berechnen nach:

$$S = \frac{n_{Litzen}}{\hat{f}} \qquad \text{Gl. 14}$$

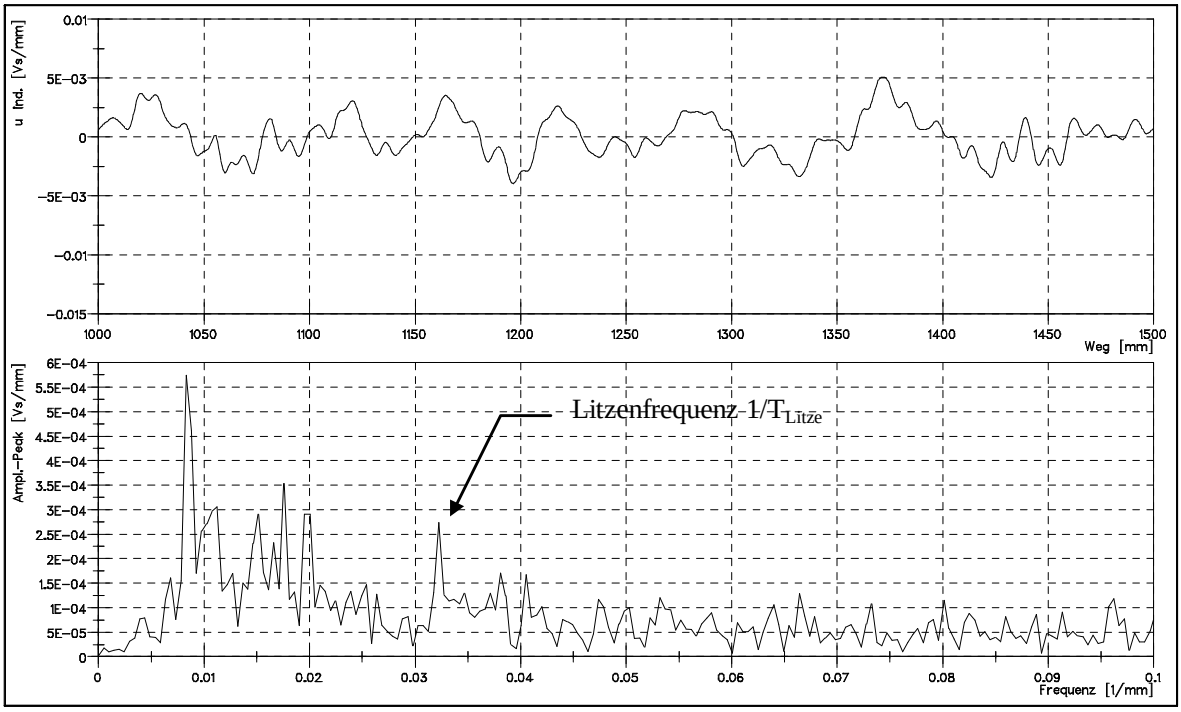

Abbildung II. 14

Signalzusammensetzung bei Messung an einem stark geschädigten Seil
Oben: aufgezeichnete induzierte Spannung
Unten: Amplitudenspektrum der induzierten Spannung

Diese Schlaglängenbestimmung mittels Frequenzanalyse des Signalverlauf der induzierten Spannung arbeitet bis zu einem gewissen Schädigungsgrad sicher [2]. Nehmen die stochastischen Anteile dann aber weiter zu, ist für die Ermittlung des maximalen Amplitudenpeaks ein Suchfenster um die zu erwartende Schlaglänge festzulegen.

II.4 Anforderungen an ein Seilprüfgerät

Das von einem Seilprüfgerät beim Überfahren eines Seilschadens gelieferte Meßergebnis hängt erheblich von der Konstruktion des Gerätes selbst ab. Das bedeutet, daß nur Meßergebnisse ein und derselben Prüfgerätekonfiguration miteinander vergleichbar sind [10]. Ursache hierfür sind die Unterschiede im Aufbau des magnetischen Kreises und in der Konstruktion der Meßspule, die auf die Meßaufgabe, d.h. auf die vorliegende Seilkonstruktion und die zu erwartenden Schäden, abzustimmen sind.

II.4.1 Der magnetische Kreis

Der magnetische Kreis schafft die Voraussetzungen für die magnetinduktive Drahtseilprüfung. Der Seilwerkstoff ist dazu hochgesättigt aufzumagnetisieren, um Hysteresseerscheinungen auszuschließen und reproduzierbare Meßergebnisse zu liefern [3]. Im Sättigungszustand gilt für den Seilwerkstoff:

$$\frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{H}} = \mu = \boldsymbol{const.} \qquad \text{Gl. 15}$$

und somit das Superpositionsprinzip, d.h. Feldüberlagerungen sind als Addition der Einzelfelder zu betrachten.
Daneben ist die Erzeugung eines homogenen, seilparallelen Feldes im Bereich der Meßspulen notwendig, um unerwünschte Radialanteile auszuschließen. Die magnetisierte Seillänge muß dazu ausreichend groß und der Abstand zwischen den beiden Magnetpolen und der Seiloberfläche möglichst klein gewählt sein. Gegenüber den in Seilprüfgeräten anfänglich eingesetzten Elektromagneten in Jochform haben sich in den letzten Jahren Permanentmagneten in radialmagnetisierter Ringform durchgesetzt. Die beiden entgegengesetzt magnetisierten, geteilten Ringe sind dabei durch einen Stahlzylinder verbunden, der den Rückschluß im magnetischen Kreis mit dem zu prüfenden Seil bildet, damit den magnetischen Kreis schließt. Aufgrund ihres seilumschließenden Aufbaus sind sie effizienter als Jochmagneten und ermöglichen beim Einsatz von Seltene Erden als Magnetmaterial den Bau kleiner und leichter Seilprüfgeräte [4] (Abbildung II. 15).

II.4.2 Die Meßspule

Die Konstruktion der Meßspule hat einen wesentlichen Einfluß auf die in ihr induzierte Spannung. Der übliche Spulentyp für Seilprüfgeräte ist die bereits beschriebene Radialspule, die nur die Radialkomponente der magnetischen Feldlinien registriert (Abbildung II. 5). Sie ist durch Spulendurchmesser, Windungszahl, Spulenbreite und Teilung charakterisiert.
Der Spulendurchmesser ergibt sich aus dem zu untersuchenden Seildurchmesser zuzüglich einer Durchmesserzugabe von ca. 2 mm. Damit werden Maßtoleranzen des Seildurchmessers berücksichtigt. Um die Anzahl der vorzuhaltenden Spulen gering zu halten, werden die Spulendurchmesser üblicherweise in 2 mm- oder 4 mm-Schritten gestuft.

Die Windungszahl der Spule ist nach dem Induktionsgesetz direkt proportional zur in der Spule induzierten Spannung:

$$U_{ind} \sim w \qquad \text{Gl. 16}$$

Je größer die Windungszahl gewählt wird, desto geringer ist die erforderliche Nachverstärkung der Meßspannung, wodurch auch Störspannungen weniger verstärkt werden. Andererseits jedoch erzeugen magnetische Störfelder bei einer hohen Windungszahl auch eine höhere Störspannung. Untersuchungen von Grupe [3] haben gezeigt, daß es eine Windungszahl mit dem günstigsten Nutzsignal-Rausch-Abstand gibt. Diese läßt sich experimentell ermitteln.
Die Spulenbreite b_{Spule}, die Ausdehnung der Spule in Seillängsrichtung, beeinflußt die Auflösung, die mit der Meßanordnung erreichbar ist. Nach Gl.10 und 11 ist die induzierte Spannung proportional zu der über die Spulenfläche gemittelten Radialkomponente der Änderung des magnetischen Flusses, d.h. die Meßspule mittelt immer die Flußänderungen über die Spulenbreite. Um Streufelder geringer Ausdehnung in Seillängsrichtung erfassen zu können, ist somit b_{Spule} möglichst klein zu wählen. In einer schmalen Spule wird jedoch nur eine geringe Spannung induziert, sie benötigt somit eine hohe Nachverstärkung und verursacht dadurch wieder einen höheren Störrauschpegel. Die optimale Spulenbreite für eine gestellte Meßaufgabe, d.h. für das

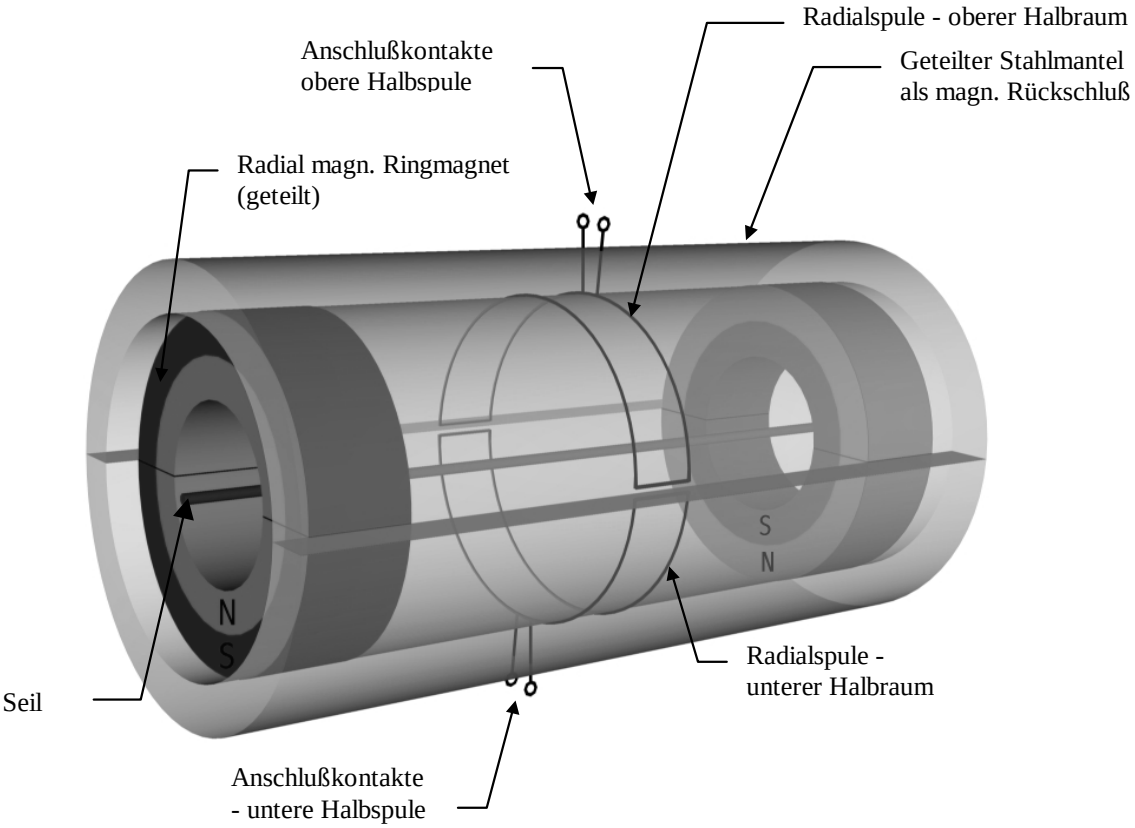

Abbildung II. 15

Längsgeteiltes Seilprüfgerät mit zwei Halbspulen und Ringmagneten

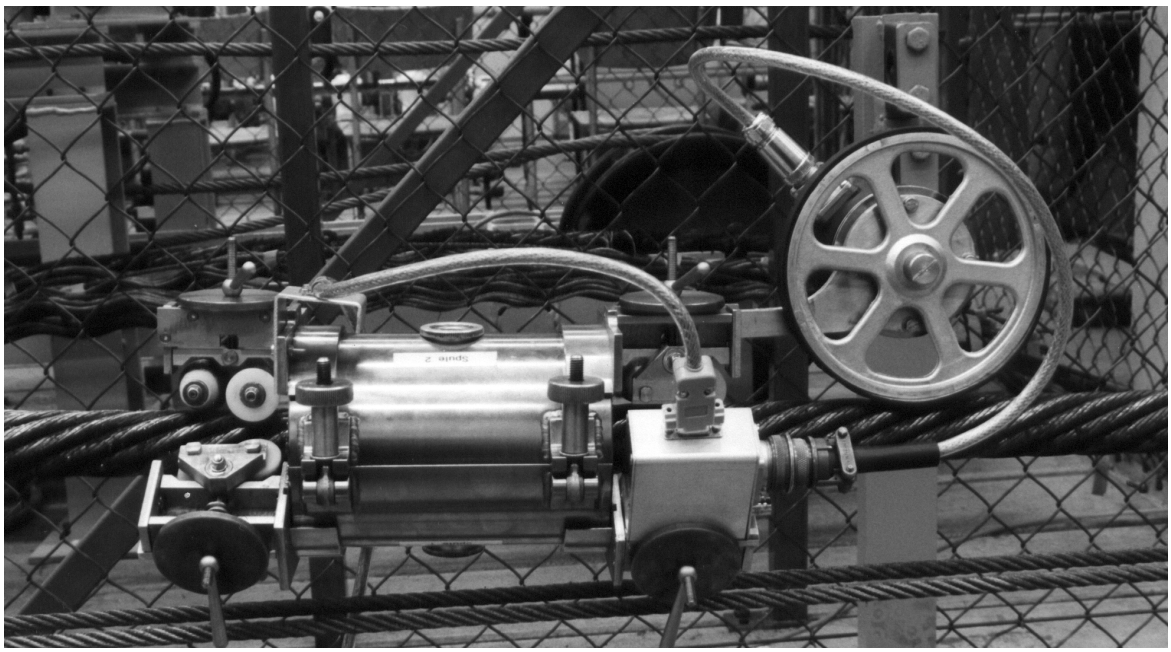

Abbildung II. 16

Längsgeteiltes Seilprüfgerät mit Inkrementalgeber und Reibrad als Seilwegaufnehmer (rechts)

Auffinden bestimmter Querschnittsfehler in einer vorgegebenen Seilkonstruktion, mit dem günstigsten Nutzsignal-Rausch-Abstand läßt sich nur experimentell ermitteln [3].

Die Notwendigkeit der Teilung der Meßspule ergibt sich aus Handhabungsgründen. Eine ungeteilte Radialspule müßte für jede Messung neu um das Seil gewickelt werden. Daher hat sich die längszweigeteilte Spule durchgesetzt, deren zwei Hälften, in einem entsprechend ausgeführten Magnetsystem eingesetzt, einfach um das Seil herumgelegt werden können (Abbildung II. 15, Abbildung II. 16). Dieser Spulenaufbau

besteht somit genau genommen aus zwei Einzelspulen, die jeweils einen Halbraum des zu prüfenden Seilabschnitts abdecken und parallel geschaltet sind, so daß das Summensignal dem einer ungeteilten Spule entspricht.