

# Ein neues Prüfsystem für die Korrosionsprüfung von Gaspipelines mit kombinierter Ultraschall-, Wirbelstrom- und Streuflussmessung

H. WILLEMS\*, F. NIESE\*\*, B. JASKOLLA\*, T.S. SICKINGER\*, O.A. BARBIAN\*

\*NDT Systems & Services AG, Friedrich-List-Str. 1, D-76297 Stutensee

\*\*Fraunhofer IZFP, Campus E3 1, D-66123 Saarbrücken

**Kurzfassung.** Für die Innenprüfung von Fernrohrleitungen werden automatisierte Prüfsysteme (sogenannte Prüfmolche) eingesetzt. Zur Erkennung und Vermessung von Materialverlusten (insbesondere Korrosionen) haben sich das Streuflussverfahren und das Ultraschallverfahren bewährt, wobei Letzteres aufgrund der direkten Messung der Restwanddicke eine genauere Tiefenaussage und damit eine zuverlässigere Fehlerbewertung ermöglicht. Während in Flüssigkeitsleitungen das Transportmedium selbst als Ankoppelmedium dient, ist der Einsatz des mit konventionellen, piezoelektrischen Prüfköpfen arbeitenden Ultraschallverfahrens in Gasleitungen nicht ohne weiteres möglich. Um die Vorteile des Ultraschallverfahrens auch für die Prüfung von Gasleitungen nutzbar zu machen, wurde ein Prüfsystem auf EMUS-Basis entwickelt, mit dem Ultraschall über elektromagnetische Wechselwirkungen direkt in der Werkstoffoberfläche erzeugt wird (EMUS-elektromagnetisch angeregter Ultraschall). Da die EMUS-Technik auf der Verwendung von Spulen basiert, wurde ein Sensorsystem entwickelt, das neben der koppelmittelfreien Ultraschallanregung gleichzeitig auch die Erfassung von Streufluss- und Wirbelstromsignalen erlaubt. Durch die synchrone Messung dreier unabhängiger, physikalischer Messgrößen lassen sich deutliche Verbesserungen sowohl bei der Fehlervermessung als auch bei der Anzeigendiskriminierung erzielen. In dem Beitrag wird das neue Sensorkonzept und dessen Realisierung sowie der Aufbau des Prüfsystems beschrieben. Erste Ergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

## 1. Einführung

Fernrohrleitungen sind ein wesentlicher Bestandteil der globalen Infrastruktur. Mehr als 3 Millionen Kilometer an Transportleitungen verbinden die Lagerstätten von Öl und Gas mit den Verschiffungshäfen, Raffinerien und Tanklagern. Die zerstörungsfreie Prüfung mittels automatisierter Prüfsysteme (sogenannte intelligente Molche) leistet einen wichtigen Beitrag zum sicheren und wirtschaftlichen Betreiben der Leitungen. Der Blick auf die historische Entwicklung dieser Prüfsysteme beginnend in den frühen siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts bis heute lässt dabei folgende Trends erkennen:

- einfache Anwendung (z.B. Geometrievermessung) => komplexe Prüfaufgabe (z.B. Rissprüfung),
- geringe Ortsauflösung (z.B. 30 mm Umfangsauflösung x 10 mm Längsauflösung) => hohe Ortsauflösung (z.B. 5 mm x 1 mm),



- Prüfsystem für eine Prüfaufgabe (z.B. Korrosionsprüfung) => Systeme für die gleichzeitige Durchführung mehrerer Prüfaufgaben (z.B. Korrosions- & Rissprüfung),
- Einverfahren-Prüfsystem (z.B. Ultraschall) => Mehrverfahren-System (z.B. Ultraschall, magnetischer Streufluss).

Es ist klar, dass diese Entwicklungsfortschritte direkt mit parallelen Entwicklungen auf anderen Gebieten verknüpft sind wie:

- Miniaturisierung von elektronische Komponenten,
- Zunahme der Rechenleistung & Datenverarbeitungsgeschwindigkeit,
- Zunahme der Datenspeicherkapazität,
- Fortschrittliche Entwicklungswerkzeuge (Software, CAD etc.),

die allesamt zu erheblichen Weiterentwicklungen und Verbesserungen im Bereich der automatisierten Prüfsysteme geführt haben [1].

Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung eines Prüfsystems (LineExplorer<sup>®</sup> 3TM: 3T -3 Technologien, M - Materialverluste) für die Inline-Inspektion von Gaspipelines auf Materialverluste (insbesondere Korrosionen), das auf der Kombination mehrerer unabhängiger, zerstörungsfreier Prüfverfahren beruht.

## 2. 3TM-Ansatz für die Inline-Inspektion von Gaspipelines

Die Standardmethode zur Inline-Inspektion von Gaspipelines auf Materialverluste ist das **magnetische Streufluss-Verfahren (MSF)** [2]. Dabei handelt es sich um ein indirektes Verfahren, mit dem die Wandstärke mit einer Genauigkeit von typisch  $\pm 10\%$  ermittelt werden kann. Im Vergleich dazu kann die (Rest-) Wandstärke mittels Ultraschallverfahren bei bekannter Schallgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.5\text{ mm}$  direkt gemessen werden. Im Falle von Materialverlusten ermöglicht das Ultraschallverfahren aufgrund der genaueren Bestimmung der Fehlertiefe auch eine zuverlässigere Fehlerbewertung, wodurch z.B. die Anzahl von Reparaturausgrabungen nach einer Inspektion reduziert werden kann.

Allerdings benötigen konventionelle (piezoelektrische) Ultraschall-Prüfköpfe ein flüssiges Ankoppelmedium, um genügend Schallenergie in die Rohrwand einzubringen. Dies ist in Flüssigkeitsleitungen kein Problem, da die Flüssigkeit (Rohöl, Diesel, etc.) in der Regel selbst als Koppelmedium benutzt wird. In Gasleitungen sind konventionelle Ultraschall-Verfahren für die Inline-Inspektion jedoch aufgrund des erheblichen akustischen Impedanzunterschiedes zwischen Rohrwand und Medium nicht ohne weiteres einsetzbar. Um auch in Gaspipelines die Vorteile des Ultraschallverfahrens nutzen zu können, wurde ein neues Prüfsystem entwickelt, mit dem auf Basis der EMUS-Technologie Ultraschall direkt in der Oberfläche der Rohrwand, d.h. ohne Koppelmedium, erzeugt wird [3,4].

### 2.1 Messprinzip

Das Funktionsprinzip des neuen Prüfsystems beruht auf der EMUS-Technik [5]. Der EMUS-Wandler befindet sich zwischen den zwei Polschuhen eines Permanentmagneten, dessen

Magnetfeld entlang der Rohrwinnenoberfläche horizontal verläuft (Abb. 1). Der Wandler selbst besteht aus einer Sende- und einer Empfangsspule, deren Auslegung für die vorliegende Anwendung optimiert wurde [6]. Über eine Pulsanregung werden polarisierte Scherwellen mit einer Mittenfrequenz von 2.5 MHz unter Verwendung des magnetostruktiven Effektes in Oberflächenbereich der Rohrwand erzeugt [3], die sich senkrecht zur Oberfläche in der Rohrwand ausbreiten. Aus der Laufzeit des Rückwandechos kann dann über die bekannte Ultraschallgeschwindigkeit die lokale (Rest-)Wanddicke bestimmt werden.

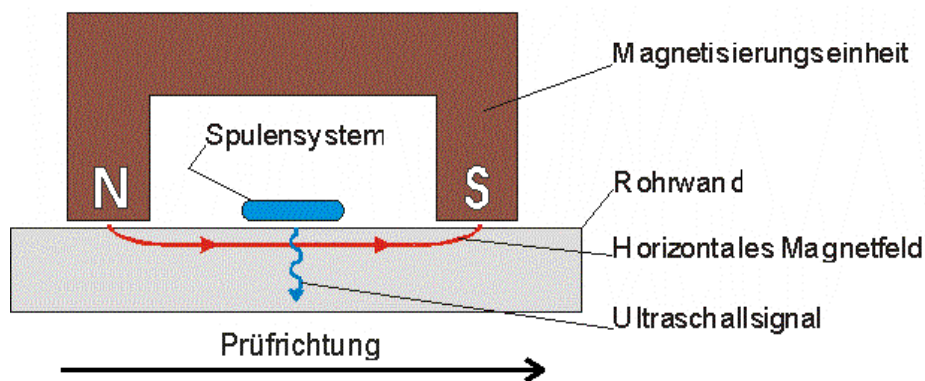


Abb. 1. Anordnung zur elektromagnetischen Anregung von Ultraschall über Magnetostriktion.

Über die EMUS-Empfangsspule kann neben dem Ultraschallsignal auch das magnetische Streufluss-Signal aufgenommen werden, das bei Bewegung der Spule in diese induziert wird. Beide Signalanteile können leicht über geeignete Filter getrennt werden. Zusätzlich kann das EMUS-Anregungssignal dazu benutzt werden, um über eine weitere Spule ein **Impuls-Wirbelstrom-Signal (IWS-Signal)** aufzuzeichnen. Die Amplitude dieses Signals hängt vom Abstand der Spule zur Oberfläche ab (s. Abb. 2) und kann damit zur Messung der Tiefe von Innenkorrosion herangezogen werden. Dies ist insofern wichtig, da das Ultraschall-Signal beim Abheben des EMUS-Wandlers stark geschwächt wird bzw. komplett ausfällt. Insgesamt erlaubt die beschriebene Anordnung die gleichzeitige, ortssynchrone Erfassung von Ultraschall-, Streufluss- und Wirbelstromsignalen.

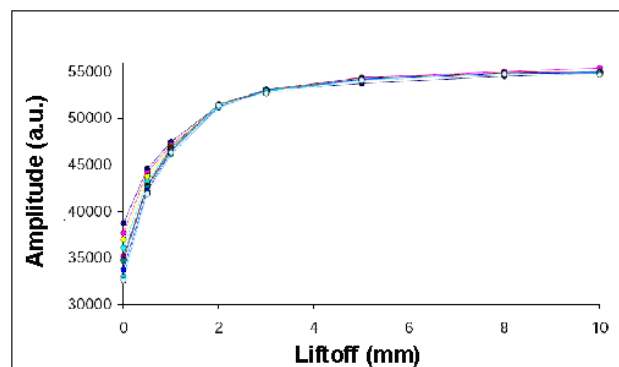
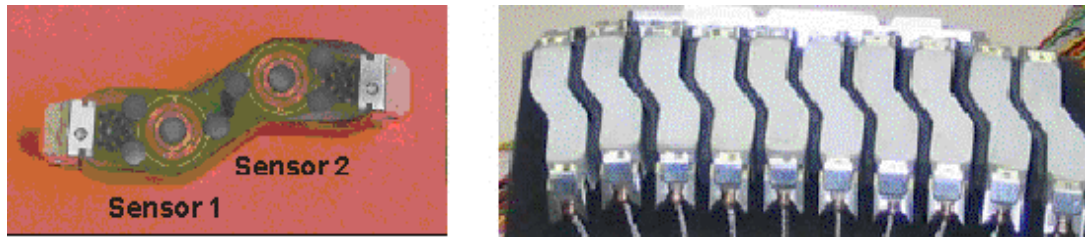


Abb. 2. Abhängigkeit des IWS-Signals (Amplitude) vom Wandabstand (Liftoff). Für Abstände > ca.7 mm erkennt man ein Sättigungsverhalten. Die verschiedenen Messkurven gehören zu unterschiedlichen Magnetfeldstärken.



**Abb. 3.** Links: Grundeinheit mit zwei Sensoren (ohne Verschleißschutz). Rechts: Sensormodul mit 10 Grundeinheiten mit keramischem Verschleißschutz. Jeder Sensor misst EMUS-, IWS- und MSF-Signale.

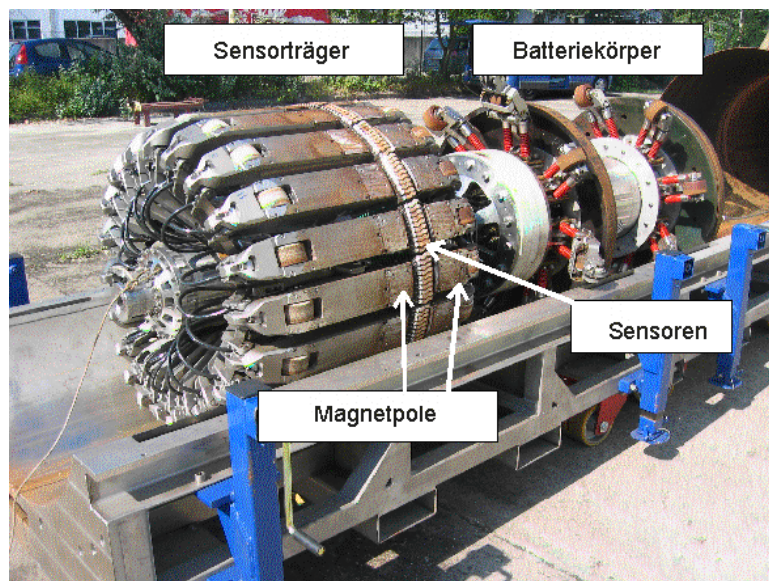
## 2.2 Sensoraufbau

Der Kombi-Sensor besteht aus einer EMUS-Sendespule, einer EMUS-Empfangsspule und einer Wirbelstromspule. Die Spulen sind konzentrisch angeordnet mit einem äußeren Durchmesser von 10 mm. Eine Grundeinheit (Abb. 3) enthält zwei Sensoren, die mit einer Keramiksicht gegen Verschleiß geschützt sind. Je 10 Grundeinheiten sind zu einem Sensormodul zusammengefasst (Abb. 3). Diese sind so zwischen den Magnetpolen befestigt, dass sie der Innenoberfläche während der Inspektion flexibel folgen können.

## 2.3 Systemaufbau

Das vorliegende Prüfsystem ist für einen Rohrdurchmesser von 40" ausgelegt (Abb. 4). Aufgrund des modularen Designs der Basiskomponenten können Prüfsysteme für andere Rohrdurchmesser relativ leicht adaptiert werden.

Der Sensorträger wird über Rollen geführt. Die 40"-Ausführung beinhaltet 20 Magnetjochs, die in die Sensorkufen integriert sind. Die Elektroneinheiten sind sensornah im Sensorträger angeordnet. Mit einer Einheit können bis zu 20 Kanäle (Sensoren) bedient werden. Insgesamt enthält der vorliegende Sensorträger 400 Sensoren, so dass sich eine Umfangsauflösung vom 8 mm ergibt. Der ebenfalls rollengeführte Frontkörper enthält Batterien und Einheiten für die Datenverarbeitung bzw. -speicherung.

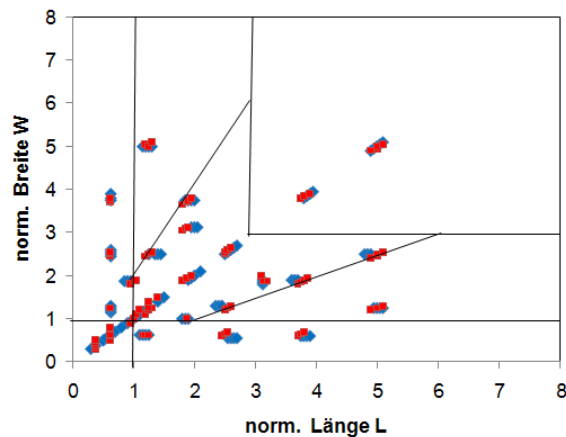


**Abb. 4:** Prüfsystem LineExplorer 3TM beim Einschleusen. Die 40" Ausführung enthält 400 Sensoren.

### 3. ERGEBNISSE

#### 3.1 Testleitung

Um die Spezifikation des Prüfsystems zu validieren, wurde eine 40"-Testleitung aufgebaut, welche ein Testfehlerrohr mit über 200 künstlichen Fehlern mit unterschiedlichen Abmessungen und Formen enthält. Die Fehler befinden sich je zur Hälfte auf der Rohrrinnen- bzw. der Rohraußenseite. Aus Abb. 5 geht die Verteilung der Testfehler gemäß POF-Spezifikation hervor [7], nach der die Fehlerform anhand des Längen/Breiten-Verhältnisses klassifiziert wird.

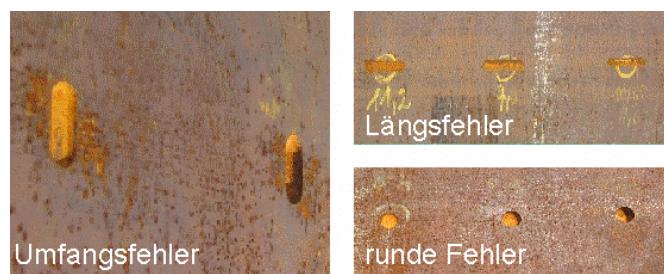


**Abb. 5:** Verteilung der Testfehler gemäß POF-Spezifikation (blau: Innenfehler, rot: Außenfehler)

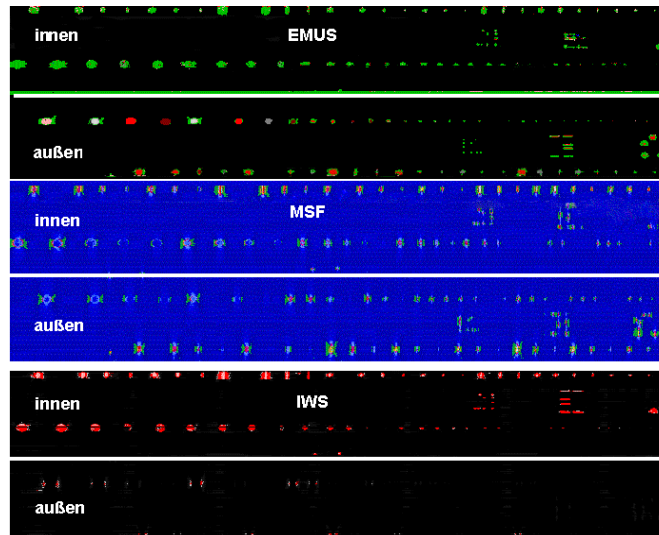
Die verschiedenen Bereiche in Abb. 5 bedeuten (die englischen Originalbezeichnungen wurden hier beibehalten):

- Pinhole ( $W < 1$  und  $L < 1$ )
- axial Slotting ( $W < 1$  und  $L \geq 1$ )
- axial Grooving ( $1 \leq W < 3$  und  $L/W \geq 2$ )
- circumferential Slotting ( $L < 1$  und  $W \geq 1$ )
- circumferential Grooving ( $1 \leq L < 3$  und  $W/L \geq 2$ )
- general Corrosion ( $W \geq 3$  und  $L \geq 3$ )
- Pitting (restlicher Bereich)

mit W: normierte Breite = Breite/wt, L: normierte Länge = Länge/wt. Die Wanddicke wt des Testrohres betrug 16 mm. Einige Beispiele zu den verschiedenen Fehlerformen sind in Abb. 6 gezeigt.



**Abb. 6:** Beispiele zu Testfehlern mit unterschiedlicher Formen

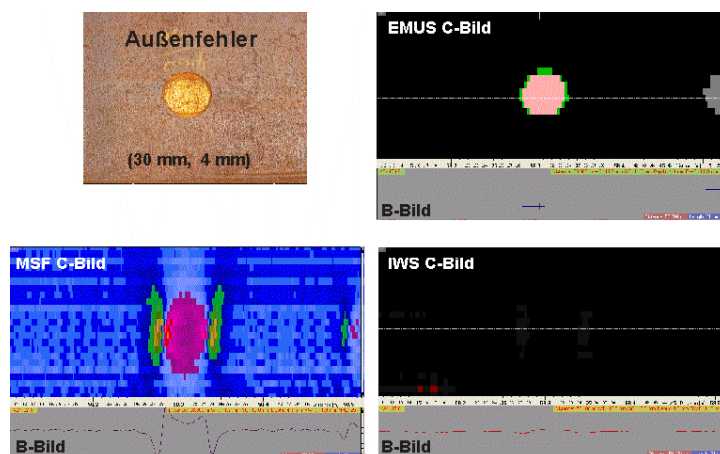


**Abb. 7:** C-Bilder: oben: EMUS; Mitte: Streufluss; unten: Wirbelstrom (die weiße Linie in den C-Bildern dient zur Trennung der Bereiche mit Innen- und Außenfehlern).

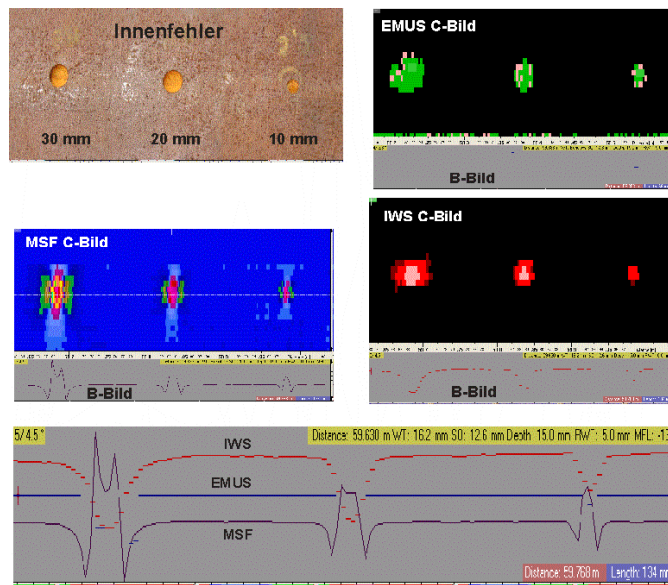
Abb. 7 zeigt im Überblick C-Bilder zu den verschiedenen Verfahren für einen größeren Bereich des Testfehlerrohrs. Mit dem MSF-Verfahren konnten alle Fehler detektiert werden (Abb. 7 mittleres Bild). Mit dem IWS-Verfahren wurden alle Innenfehler gefunden (Abb. 7 unteres Bild). Auch bei einigen tieferen Außenfehlern sind hier Anzeigen erkennbar, die jedoch ein anderes Muster aufweisen und so leicht von Innenfehlern unterschieden werden können. Als Ursache für die Entstehung dieser Anzeigen werden Permeabilitätsänderungen vermutet.

Abgesehen von einigen Fehlern mit Abmessungen  $< 10$  mm, d.h. unterhalb der Fehlerspezifikation des Prüfsystems, konnten mit dem EMUS-Verfahren alle Außenfehler nachgewiesen werden (Abb. 7 oberes Bild). Sensorabhebungen  $> ca. 1$  mm, wie sie z.B. an Innenfehlern auftreten, führen hier zum Signalverlust, der in grün angezeigt wird.

In Abb. 8 ist das Ergebnis für einen einzelnen Außenfehlers dargestellt. Die korrekte Tiefe von 4 mm kann direkt aus der B-Bild-Darstellung des EMUS-Signals gemessen werden. Wie zu erwarten, ist im IWS-C-Bild kein signifikantes Signal erkennbar. Das MFL-C-Bild zeigt die Ableitung der Radialkomponente des magnetischen Streuflusses. Hier ist im B-Bild ein starker Gradient im Bereich der Fehlerenden zu erkennen. Die Fehlerlänge kann durch



**Abb. 8:** C- und B-Bilder eines kreisförmigen Außenfehlers (Durchmesser: 30 mm, Tiefe: 4 mm)

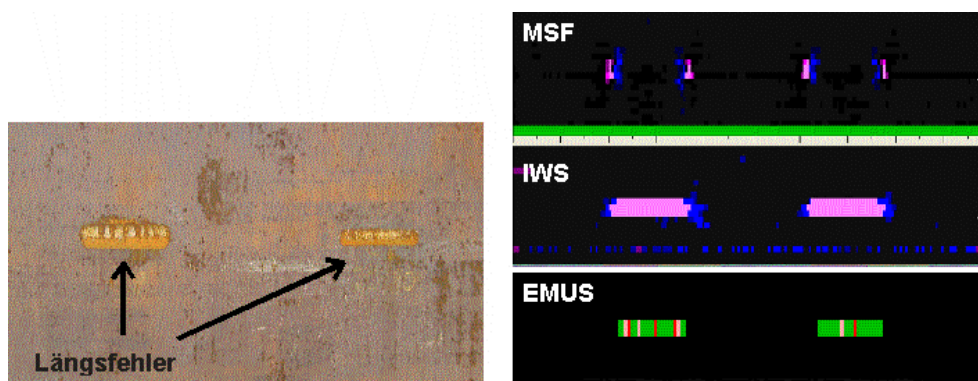


**Abb. 9:** C-Bilder einer Gruppe von drei Innenfehlern (unten: B-Bilder entlang der Fehlermitte).

Messung des Abstandes zwischen den entsprechenden Nulldurchgängen sehr genau bestimmt werden.

Ein Beispiel für Innenfehler ist in Abb. 9 für drei nebeneinanderliegende kreisförmige Fehler dargestellt. Hier kann unter Einbeziehung der Kalibrierkurve die korrekte Tiefe aus dem IWS-Signal ermittelt werden (s. B-Bild in Abb. 9). Zusätzlich kann die Tiefe auch über das MSF-Signal abgeleitet und ggf. bestätigt werden. Aufgrund der Sensorabhebung verschwindet das EMUS-Signal (Echoloss), was durch die grüne Anzeige erkennbar ist. Aus der Echoloss-Anzeige können jedoch Länge und Breite des Fehlers bestimmt werden.

Ein weiteres Beispiel (s. Abb. 10) bezieht sich auf den Fehlertyp "schmaler Längsfehler". Dieser Fehlertyp kann beim Standard-MSF-Verfahren zu Problemen führen, da oft nur die Fehlerenden signifikante Anzeigen produzieren. Dann kann es vorkommen, dass ein langer Fehler fälschlicherweise als zwei kleine Einzelfehler interpretiert wird. Durch die hier benutzte Verfahrenskombination liefert der Vergleich mit den EMUS- bzw. IWS-Anzeigen eine eindeutige Aussage über die Art des Fehler, wie aus Abb. 10 hervorgeht.

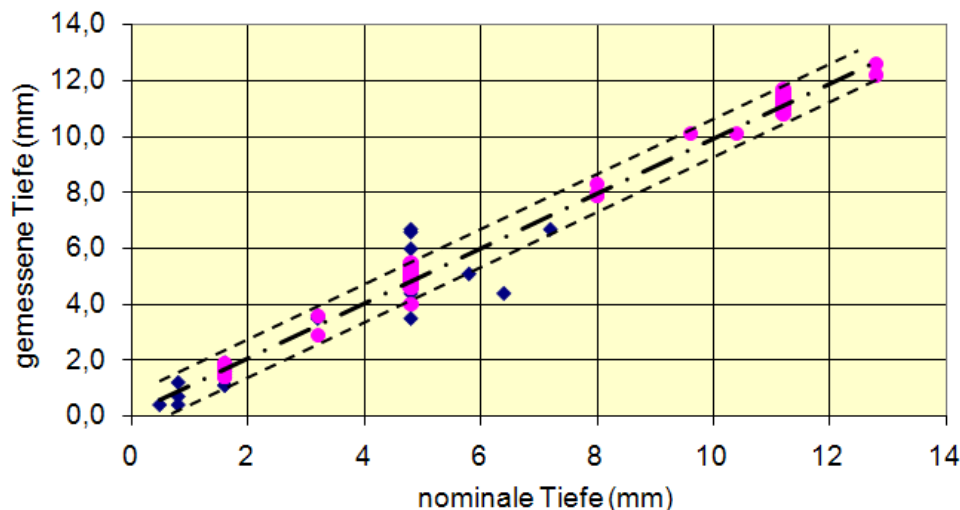


**Abb. 10:** C-Bilder mit MFL-, IWS- und EMUS Anzeigen eines schmalen Längsfehlers an der Rohrinne.

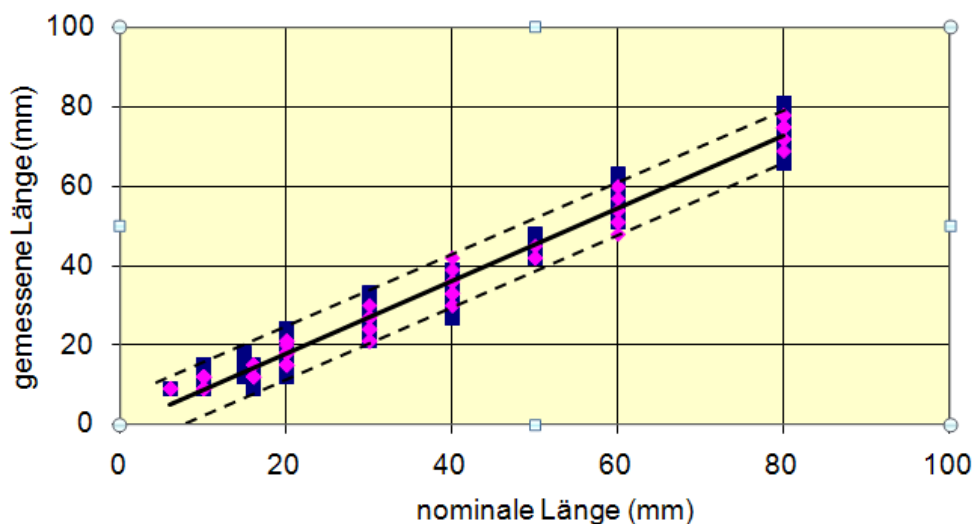
Zur Demonstration der erreichbaren Messgenauigkeit des neuen Prüfsystems sind in den Abbildungen 11, 12 einige Ergebnisse dargestellt. Abb. 11 zeigt den Vergleich der mit den zf-Verfahren gemessenen Fehlertiefen mit den Sollwerten für Fehlergrößen  $\geq 20$  mm, wobei die Auswertung für die Außenfehler mit den EMUS-Daten bzw. für die Innenfehler mit den

IWS-Daten erfolgte. Für die EMUS-Tiefenmessung ergibt sich ein Messfehler von  $\pm 0.5$  mm bei einem Vertrauensniveau von 90 %, was bei der hier vorliegenden Wanddicke von 16 mm einer relativen Genauigkeit von  $\pm 3.1$  % entspricht. Für die Längenmessung (Abb. 12), die mit den MFS-Daten durchgeführt wurde, liegt die Genauigkeit bei  $\pm 6$  mm bei 90 % Vertrauensniveau.

Für Fehlerabmessungen unterhalb ca. 20 mm wird die Tiefenmessung insbesondere beim IWS-Verfahren dadurch beeinträchtigt, dass die Sensorabmessung vergleichbar zur Fehlerabmessung wird. In diesem Fall kann die Genauigkeit durch eine fehlergrößenabhängige Korrektur verbessert werden.



**Abb. 11:** Vergleich zwischen gemessener Tiefe und nominaler Tiefe (●: EMUS-Ergebnis Außenfehler, ◆: IWS-Ergebnis Innenfehler). Hinweis: Einige Datenpunkte können zu mehreren Testfehlern gehören.



**Abb. 12:** Vergleich zwischen gemessener Länge (MSF) und nominaler Länge (◆: Außenfehler, ■: Innenfehler). Hinweis: Einige Datenpunkte können zu mehreren Testfehlern gehören.

#### 4. Diskussion

Die in dem neuen Prüfsystem realisierte, simultane Nutzung dreier unabhängiger physikalischer Verfahren (Ultraschall, Wirbelstrom, magnetischer Streufluss) bietet im Vergleich zu Standard-Prüfsystemen mehrere Vorteile. Die parallele Visualisierung der absolut ortssynchron vorliegenden Prüfdatensätze erlaubt im Rahmen der Datenauswertung



sowohl eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit (POD - **probability of detection**) als auch eine verbesserte Anzeigendiskriminierung (POI - **probability of identification**). So weisen beispielsweise Laminationen oder Einschlüsse, die in manchen Rohrleitungen relativ häufig vorkommen, im Ultraschallbild Muster auf, die denen von externen Materialverlusten ähneln. Andererseits wird diese Art von Rohranomalien weder im IWS- noch im MSF-Signal angezeigt, so dass anhand der kombinierten Information eine eindeutige Unterscheidung möglich ist.

Weiterhin können die Abmessungen von Materialverlusten (Länge, Breite, Tiefe) genauer bestimmt werden, da jede Abmessung redundant mit mindestens zwei Verfahren erfasst wird (s. Tabelle 1). Im Falle von Außenfehlern liefert die Ultraschall-Messung die beste Genauigkeit für die Fehlertiefe, da die Restwanddicke direkt gemessen wird. Bei Innenfehlern kann die Tiefe aus der IWS-Anzeige bestimmt werden, wozu eine Kalibrierkurve benötigt wird (s. Abb. 2). Aus dem MSF-Signal kann die Tiefe in beiden Fällen ermittelt werden. Dazu müssen allerdings entsprechende Auswertelgorithmen entwickelt bzw. optimiert werden. Im Vergleich zu Standard-MSF-Systemen hat das Kombi-Verfahren den Vorteil, dass die lokale Referenzwandstärke aus der Ultraschallmessung bekannt ist, wodurch der normalerweise durch die Unkenntnis der genauen Wandstärke verursachte Unsicherheit bei der MSF-Tiefenbestimmung entfällt.

**Tabelle 1.** Vermessungsoptionen für Länge und Tiefe von Materialverlusten.

VERFAHREN	MATERIALVERLUST innen		MATERIALVERLUST außen	
	Länge	Tiefe	Länge	Tiefe
EMUS	<i>indirekt</i>	/	<i>direkt</i>	<i>direkt</i>
IWS	<i>direkt</i>	<i>indirekt*</i>	/	/
MSF	<i>direkt</i>	<i>indirekt</i>	<i>direkt</i>	<i>indirekt</i>

\*Kalibrierkurve

## 5. Zusammenfassung

Das vorgestellte Prüfsystem ermöglicht eine innovative Inline-Inspektion von Gaspipelines. Verglichen mit konventionellen Systemen bietet die hier realisierte, simultane Anwendung dreier unabhängiger zFP-Verfahren (EMUS, Wirbelstrom, magnetischer Streufluss) Vorteile wie

- verbesserte Nachweisempfindlichkeit,
- verbesserte Anzeigendiskriminierung,
- genauere Bestimmung der Fehlertiefe (insbesondere für Außenkorrosion),
- Rohrbucherstellung mit Angabe der genauen Wanddicke für jedes Einzelrohr.

Für den Leitungsbetreiber bedeuten diese Verbesserungen sowohl eine Verringerung der Folgekosten einer Inspektion beispielsweise durch Reduktion der Falschalarmrate (d.h. weniger Fehlgründungen) als auch eine zuverlässigere Anzeigenbewertung aufgrund der genaueren Bestimmung der Fehlerabmessungen.

## REFERENZEN

- [1] Barbian, O.A. et al, Handbook Automated Ultrasonic Testing Systems, IIW Handbook (ISBN 3-87155-953-9), DVS Verlag, DGZfP (ed.), Berlin, 2004.
- [2] Pipeline Pigging & Integrity Technology, 3<sup>rd</sup> edition, John Tiratsoo (ed.), Gulf Publishing Company, 2003.
- [3] Hirao, M. and Ogi, H.: EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements (ISBN 1-4020-7494-8), Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [4] Hübschen, G., Replinger, W., Salzburger, H.-J.: Ultraschallprüfung mit elektromagnetischen Wandlern; FhG-Berichte No. 1, S. 23-32, 1984.
- [5] Yashan, A., Willems, H. and Niese, F.: Method and System for Non-Destructively Testing a Metallic Workpiece, International Patent Application WO 2007/068327 A1, 2007.
- [6] Niese, F., Yashan, A., Willems, H.: Wall-Thickness Measurement Sensor for Pipeline Inspection using EMAT Technology in Combination with Pulsed Eddy Current and MFL, 9<sup>th</sup> European Conference on NDT, Berlin, 2006.
- [7] Pipeline Operator Forum (POF): Specifications and Requirements for Intelligent Pig Inspection of Pipelines; Draft Version 2008.