



# Fortschrittliche Konzepte für die Ultraschall-Prüfung von Rohrleitungen

Herbert WILLEMS, Michael WERLE, NDT Systems & Services, Stutensee  
Werner BÄHR, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

**Kurzfassung.** Die Inline-Prüfung von Rohrleitungen (Pipelines) ist aufgrund der vielfältigen Prüfbedingungen und der dabei auftretenden enormen Datenmengen eine große Herausforderung für automatische Prüfsysteme. Auf Ultraschall-Basis arbeitende Systeme (Molche) werden inzwischen standardmäßig für die Prüfung auf Korrosionen und Risse in Fernleitungen eingesetzt. Dabei erlauben Fortschritte in der Miniaturisierung von elektronischen Bauteilen sowie in der Sensortechnologie sowohl Verbesserungen hinsichtlich der Prüfgenauigkeit als auch neue Anwendungsbereiche. Der Beitrag beschäftigt sich mit in den letzten Jahren entwickelten Konzepten aus dem Bereich der Ultraschallprüfung. Deren Umsetzung wird anhand von Beispielen aus der Prüfpraxis illustriert.

## 1. Einführung

Der Einsatz von Ultraschall zur Inline-Prüfung von Fernrohrleitungen mit Hilfe von automatisierten Prüfsystemen (sogenannten intelligenten Molchen) hat zwei etablierte Hauptanwendungsgebiete. Seit Anfang der achtziger Jahre sind Molche zur Detektion von Materialverlusten (z.B. Korrosion) mittels Ultraschall-Wanddickenmessung im Einsatz [1]. Anfang der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts wurden Molche für die Prüfung auf Längsrisse unter Nutzung von 45°-Transversalwellen entwickelt [2,3]. Beide Varianten werden mittlerweile von mehreren Anbietern weltweit eingesetzt.

Dank der zunehmenden Miniaturisierung von Elektronikbauteilen (bei gleichzeitig geringeren Kosten, s. Tabelle 1), der Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Datenverarbeitungs-Komponenten sowie des Einsatzes fortschrittlicher Sensortechnologien konnten in den letzten Jahren neue Konzepte realisiert werden, durch die der Anwendungsbereich dieser Systeme deutlich erweitert werden konnte. Dazu zählen:

- Erhöhung der Systemverfügbarkeit durch Modulbauweise
- Ausweitung des Einsatzbereiches auf kleinere Rohrdurchmesser
- Höhere Auflösung bei der Wanddickenmessung zur Detektion von Materialverlusten (Korrosion etc.) durch Erhöhung der Anzahl der Prüfkanäle
- Einsatz von Kombi-Tools zur gleichzeitigen Wanddickenmessung und Rissprüfung in einem Inspektionslauf
- Erweiterung der Rissprüfung auf die Prüfung von Rund- und Spiralnähten. (Die bisher verfügbaren Systeme sind für die Prüfung auf Längsfehler ausgelegt.)
- Ultraschall-Wanddickenmessung in Gasleitungen

Als Beispiel zum Fortschritt auf der Datenverarbeitungsseite zeigt Tabelle 1 den Entwicklungsfortschritt von Speichermedien, die für Inline-Prüfsysteme eingesetzt werden, seit dem Jahr 1999. Wie zu erkennen ist, sind die Preise von Festkörperspeichern bei gleichzeitig erheblicher Volumenreduzierung deutlich gefallen.

**Tabelle 1.** Entwicklungsfortschritt bei Speichermedien, die in Inline-Prüfsystemen eingesetzt werden.

<b>Jahr</b>	<b>Speichermedium</b>	<b>Kapazität/Einheit (GB)</b>	<b>ca. Preis/GB (Euro)</b>
1999	Hard Disc (Festplatten)	8	125
2003	Flash Disc	20	500
2007	Flash Disc	100	50

## 2. Aufgabenstellung bei der Inline-Prüfung von Rohrleitungen

### 2.1 Fehlerdetektion

Primäres Ziel der Inline-Inspektion von Rohrleitungen ist die zuverlässige, frühzeitige Detektion von betriebs- oder herstellungsbedingten Fehlstellen, welche die Integrität der Leitung beeinträchtigen. Solche Fehler können in die Kategorien

- mechanische Verformungen (Beulen, Ovalitäten, Falten etc.)
- Materialverluste (flächige Korrosionen, Pittings, Erosionen, Abschleifungen etc.)
- rissähnliche Fehler (Ermüdungsrisse, Spannungskorrosionsrisse, Bindefehler etc.)

eingeteilt werden, wobei selbstverständlich auch Kombinationen auftreten können. Zur Detektion und Vermessung von Verformungen werden sogenannte Caliper-Molche eingesetzt, während zum Nachweis von Materialverlusten Ultraschall- oder Streuflussmolche genutzt werden. Zum Nachweis planarer bzw. rissähnlicher Fehler haben sich Ultraschallverfahren bewährt. Generell ist der Einsatz von herkömmlichen Ultraschallmolchen, d.h. Molchen die mit piezoelektrischen Wandlern arbeiten, auf Flüssigkeitsleitungen beschränkt: In Ausnahmefällen können damit auch Gasleitungen inspiziert werden, wobei der Molch dann in einem Flüssigkeitsbatch betrieben wird. Eine Übersicht zur Standard-Defektspezifikation für Ultraschallmolche gibt Tabelle 2.

**Tabelle 2.** Typische Defektspezifikation für Ultraschallmolche

<b>Anwendung</b>	<b>POD (%)</b>	<b>min. Länge (mm)</b>	<b>min Tiefe (mm)</b>
Wanddickenmessung	95	20	0.5
Rissprüfung	90	30	1 (2*)

\*in Schweißnaht

Weitere Einzelheiten bzgl. Anforderungen an das Prüfsystem sowie Prüfbedingungen sind z.B. in [4] beschrieben.

### 2.2 Fehlerbewertung

Die Ergebnisse einer Inline-Inspektion dienen neben den Werkstoffeigenschaften und Betriebsbedingungen als Eingangsgrößen für die Fehlerbewertung. Aufgabe der Bewertung ist die Berechnung von zulässigen Betriebsdrücken für gefundene Fehlstellen anhand internationaler Standards. Liegen darüber hinaus Inspektionsdaten von früheren Inspektionen vor, können über Laufvergleich weitergehende Analysen z. B. hinsichtlich

- Fehlerwachstum und
- Festlegung von Inspektionsintervallen
- Fitness for Purpose

durchgeführt werden. Je genauer die Eingangsgrößen (hier die Fehlerabmessungen) vorliegen, um so zuverlässiger kann eine Fehlstelle bewertet werden. Das Ergebnis der Bewertung ist letzten Endes entscheidend für die Maßnahmen, die vom Betreiber zur Gewährleistung der Leitungsintegrität zu treffen sind (Reparatur, Rohraustausch etc.). Es liegt auf der Hand, dass neben der zuverlässigen Detektion eine möglichst genaue Aussage zu Fehlertyp und Fehlerabmessungen (ggf. Fehlerprofil) ultimatives Ziel jeder Inspektion sein muss.

### **3. Elektronik und Datenverarbeitung**

Die nach wie vor zunehmende Miniaturisierung von Elektronik- und Datenverarbeitungsbausteinen bei gleichzeitig verbesserter Leistungsfähigkeit spielt bei der Entwicklung von Inline-Prüfsystemen eine wesentliche Rolle. Ihre konsequente Nutzung ermöglicht Fortschritte wie z. B.:

- Erhöhung der Prüfkanaldichte (kleinere Leitungsdurchmesser, mehrere Anwendungen in einem System)
- verbesserte Online-Datenverarbeitung (Online-Auswertung, Einsatz komplexer Algorithmen zur Fehlererkennung u. -vermessung)
- verfeinerte Datenaufzeichnung (höhere Auflösung bei der Aufzeichnung von Messsignalen, ggf. Möglichkeit der Offline-Nachauswertung)

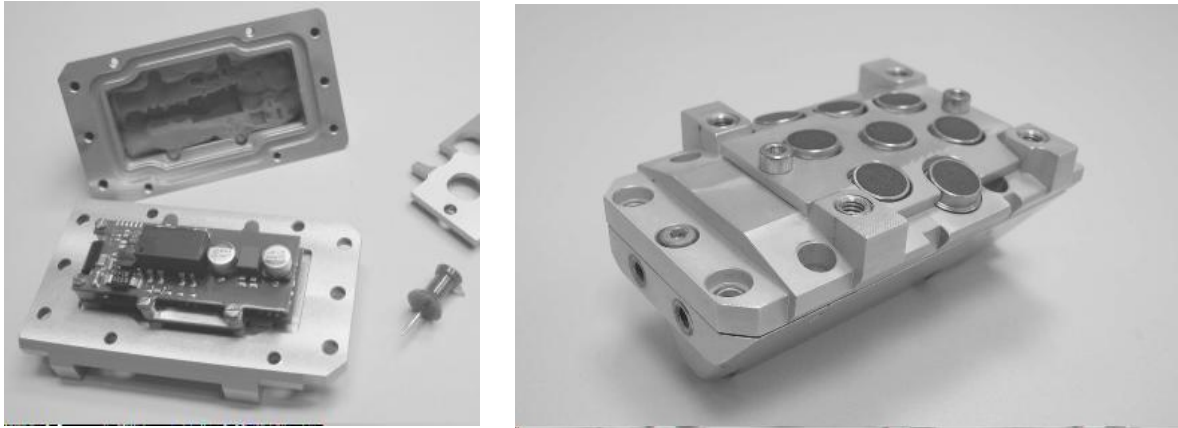
In Klammern sind jeweils resultierende Anwendungsmöglichkeiten angegeben. Beispiele aus dem Bereich der Prüfelektronik bzw. der Datenverarbeitung sind nachfolgend beschrieben.

#### *3.1 Prüfelektronik*

Für die Ultraschallprüfung von Leitungen mit Durchmessern von 6" - 8" werden bis zu 128 Prüfkanäle benötigt. Mit der vorhandenen Elektronik war dies aus Platzgründen nicht möglich. Im Rahmen einer Neuentwicklung mussten zusätzlich folgende Randbedingungen eingehalten werden:

- Integration von bis zu 16 zeitparallelen Datenerfassungs- und Verarbeitungskanälen
- Reduzierung der Steckeranzahl und Minimierung der Verkabelungsräume
- Modularer Sensorträger zur Anpassung an die Pipelinedurchmesser und an die jeweilige Prüfaufgabe (Längsfehler, Querfehler, Wanddicke)
- Geringer Energieverbrauch und geringe Verlustleistung
- Passierbarkeit von 1,5 D Rohrbögen
- Druckfestigkeit bis 120 bar
- Temperaturbereich -10 °C bis +50 °C

Durch eine enge Verzahnung von Elektronik, Mechanik und Ultraschallsensorik konnte eine Lösung realisiert werden, welche die gestellten Anforderungen erfüllt. Dazu wurde eine Star-Flex-Schaltung entwickelt, die sehr platzsparend alle notwendigen elektronischen Bauelemente und elektrischen Verbindungen in drei übereinander faltbaren Ebenen beherbergt (s. Abb. 2). Die Ultraschallprüfköpfe werden dabei direkt und ohne Zwischensteckung an die Elektronik kontaktiert. Durch die räumliche Nähe der Empfangselektronik zur Sensorik konnte gleichzeitig auch das Signal-Rauschverhältnis verbessert werden.

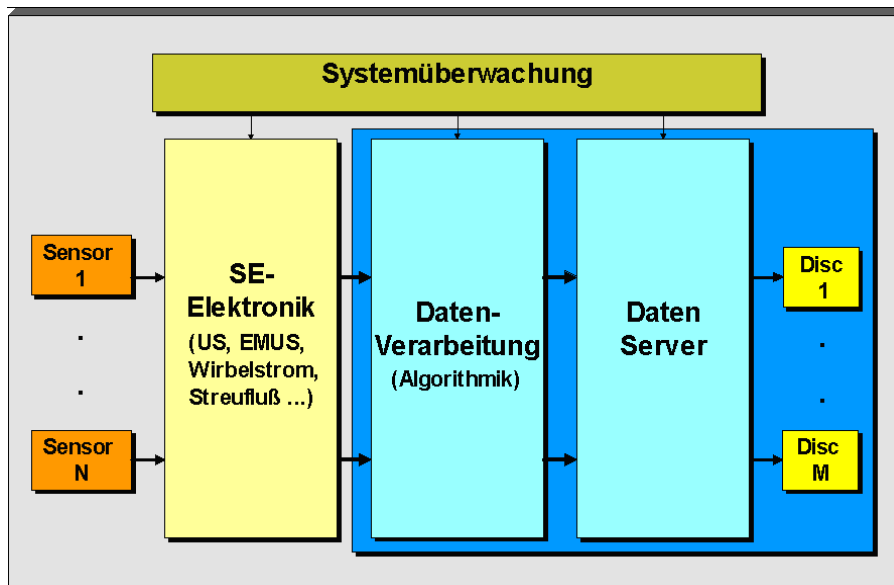


**Abb. 2:** 16-kanalige Ultraschall S/E-Elektronik (links) und Sensorhalter mit acht integrierten Prüfköpfen (rechts) für den Einsatz in 6"-Leitungen.

### 3.2 Online-Datenverarbeitung

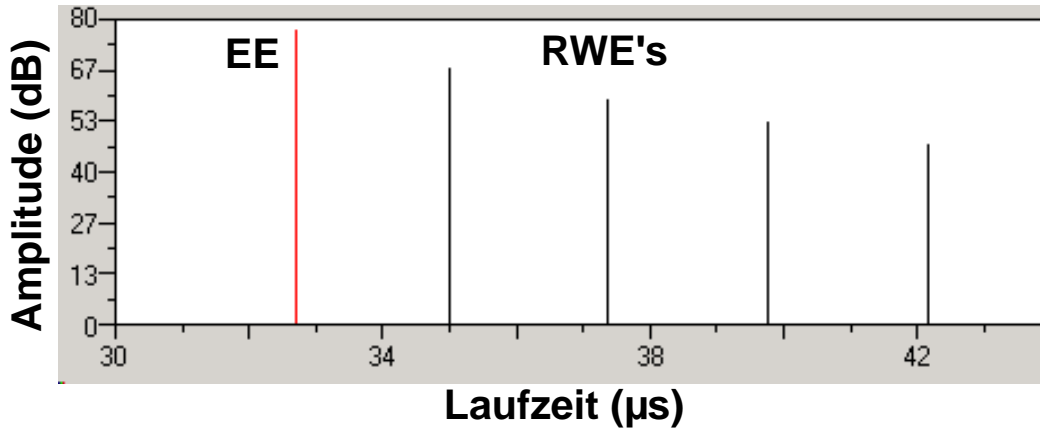
Durch Einsatz neuester hochintegrierter Bausteine, sowohl im Analog- wie Digitaldesign, lassen sich sämtliche Verarbeitungsschritte der Online-Datenverarbeitung, wie Signalkonditionierung, Digitalisierung und Algorithmik heutzutage miniaturisiert und leistungssparend aufbauen, wobei inzwischen Verarbeitungsgeschwindigkeiten erreicht werden, die auch sehr komplexe Signalauswertungen zulassen.

Durch Verwendung modellbasierter Entwicklung im Hard- und Firmware-Bereich können Datenverarbeitungssysteme für die Pipelineprüfung realisiert werden, die durch Modularität und Verwendung von standardisierten Blockbausteinen leicht auf verschiedene Größen und unterschiedliche Prüftechnologien anpassbar sind. Hardwareanpassungen sind lediglich im Bereich der Signalerfassung bzw. Sensoransteuerung nötig (Abb.3). Durch den Einsatz von parallel arbeitenden Strukturen lassen sich die Prüfgeschwindigkeit und die Kanaldichte gegenüber herkömmlichen Molchsystemen deutlich erhöhen.



**Abb. 3:** Online-Datenverarbeitung (schematisch): Im Anschluss an eine sensorspezifische Sende/Empfangs-Einheit (links) kommt eine universell verwendbare Verarbeitungseinheit zum Einsatz (rechts).

Der modulare Ansatz erlaubt den Einsatz der jeweiligen Prüftechnologie sowohl im Molchbereich für Leitungsdurchmesser von 6" – 60" als auch im Anlagenbau für stationäre Prüfsysteme. Als Vorteile seien u.a. genannt: A-Scan-Aufzeichnung relevanter Signale bei der Wanddickenmessung (s. Abb 4), schnelle Bewertung der aufgezeichneten Messdaten unmittelbar im Anschluss an die Prüfung sowie hohe Systemverfügbarkeit durch netzwerkbasierte Systemüberwachung.



**Abb. 4:** A-Scan-Aufzeichnung mit ALOK-Reduktion [5] am Beispiel einer Rückwand-Echofolge (RWE) in einer Rohrwand (EE - Eintrittsecho).

#### 4. Anwendungsbeispiele

##### 4.1 Hochauflösende Wanddickenmessung

Leitungsinspektionen mit Ultraschall werden im Falle von Standardanwendungen mit Längsaufösungen von ca. 3 mm und Umfangauflösungen (Spurabstand) von ca. 8 mm durchgeführt. Die Detektion und Vermessung von Materialverlusten mit Abmessungen unterhalb von ca. 20 mm (z.B. Pittings) ist unter diesen Voraussetzungen nicht mehr sicher gewährleistet. Durch Erhöhung der Kanalanzahl und durch Einsatz optimierter Ultraschallprüfköpfe können hier deutliche Verbesserungen erzielt werden, so dass mit geeigneter Konfiguration auch Pittings ab ca. 10 mm detektiert und vermessen werden können (s. Tabelle 3). Weiterhin können über die verbesserte Auflösung auch Fehlerprofile genauer erfasst werden, was wiederum eine zuverlässigere Fehlerbewertung ermöglicht. Aufgrund der doppelten Kanalanzahl und der um den Faktor 2 besseren Längsauflösung erhöht sich die Datenmenge beim Übergang von Standard- zur Pittingkonfiguration auf das Vierfache (s. Tabelle 3).

**Tabelle 3.** Messauflösung bei der Wanddicken-Messung für verschiedene Konfigurationen

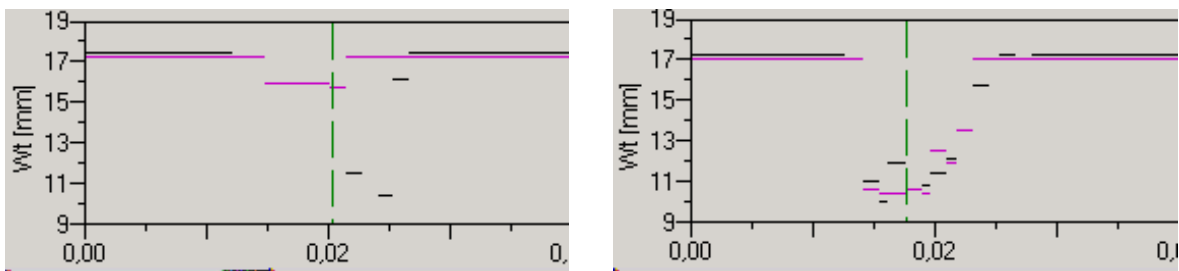
Konfiguration	Längsauflösung (mm)	Umfangsauflösung (mm)	Kanalanzahl (%)	Datenmenge (%)
<i>Standard</i>	3	8	100	100
<i>HR (High Resolution)</i>	1.5	5.5	150	300
<i>Pitting</i>	1.5 (0.75)	4	200	400 (800)

Ein Beispiel zum Aufbau der unterschiedlichen Prüfkopfanordnungen zeigt Abb. 5.



**Abb. 5:** Prüfkopfarrangements für die Ultraschall-Wanddickenmessung: Standard- (links), HR- (Mitte) und Pitting-Konfiguration (rechts).

Ein Ergebnis, das die durch Erhöhung der Prüfkopfdichte und der Längsauflösung verbesserte Fehlerrückmeldung demonstriert, ist in Abb. 6 am Beispiel eines Pittings (Länge: 15 mm) gezeigt. Die Stelle war im Rahmen einer früheren Standardinspektion gefunden worden. Zur Wiederholungsprüfung wurde eine HR-Version des Prüfmolches eingesetzt. Während mit der Standardauflösung kein eindeutiges Tiefenprofil nachvollziehbar ist, liefert die HR-Variante hier ein deutlich erkennbares Profil, aus dem im vorliegenden Fall eine Maximaltiefe von 10 mm ermittelt werden kann.



**Abb. 6:** Tiefenprofil einer Pitting-Anzeige, aufgezeichnet mit Standard-Konfiguration (links) bzw. mit HR-Konfiguration (rechts). Die schwarz dargestellten Messwerte sind aus der RWE-Folge, die farbig dargestellten Messwerte aus dem Eintrittsecho berechnet. Mit der HR-Variante ergeben beide Messungen eine Fehlertiefe von 10 mm.

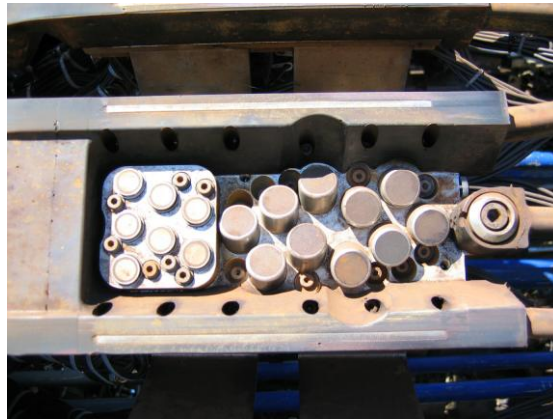
#### 4.2 Kombi-Molch

Die Erhöhung der Kanalanzahl/Volumeneinheit hat zur Folge, dass nun selbst bei relativ kleinen Durchmessern genügend Ultraschall-Kanäle verfügbar sind, um Wanddickenmessung und Rissprüfung gleichzeitig in einem Inspektionslauf durchzuführen. Dies bringt für den Leitungsbetreiber erhebliche Zeit- und Kostenvorteile, da viele Vorgänge im Zusammenhang mit der Inspektion nur einmal erforderlich sind (Leitungsreinigung, Mobilisierung, Molchverfolgung etc.). Darüber hinaus ergeben sich auch wesentliche Vorteile für die Datenauswertung: Durch die synchrone Aufzeichnung der verschiedenen Prüfdaten ist eine direkte Gegenüberstellung der Datensätze ohne zusätzliche Korrekturen möglich. Dadurch kann z.B. in Zweifelsfällen die Klassifizierung von Anzeigen deutlich verbessert werden, da Rissprüfdaten und Wanddickedaten oft komplementäre Informationen enthalten.

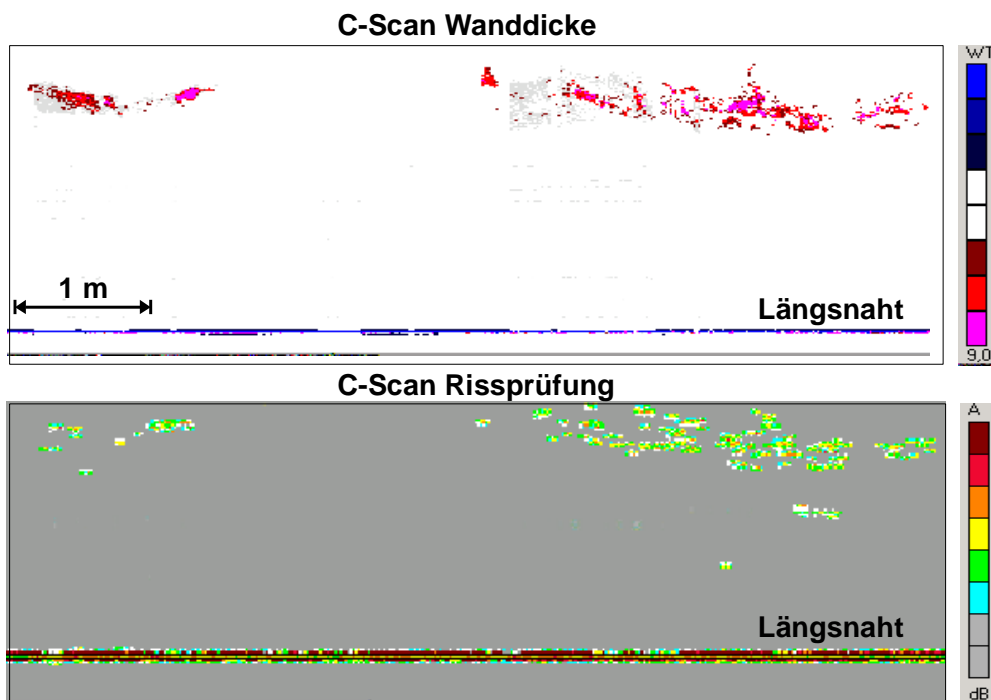
Für die praktische Umsetzung war es erforderlich, sowohl die Prüfköpfe für die Wanddickenmessung als auch die Prüfköpfe für die Rissprüfung in einem gemeinsamen



Sensorträger unterzubringen. Zur kombinierten Inspektion einer 36"-Gasleitung, die unter Verwendung eines Wasserbatches geprüft wurde [6], waren insgesamt 918 Prüfköpfe im Sensorträger unterzubringen. Abb. 7 illustriert den Aufbau des Sensorträgers. Ein Ergebnis der Inspektion ist in Abb. 8 dargestellt. Die beiden C-Bilder zeigen Wanddicke- bzw. Rissprüfdaten eines Bereichs, in dem großflächige Korrosion in Verbindung mit Rissfeldern zu erkennen ist.



**Abb. 7:** Sensorträger (Ausschnitt) mit Prüfköpfen zur Senkrechteinschallung für die Wanddickenmessung bzw. zur Schrägeinschallung für die Rissprüfung



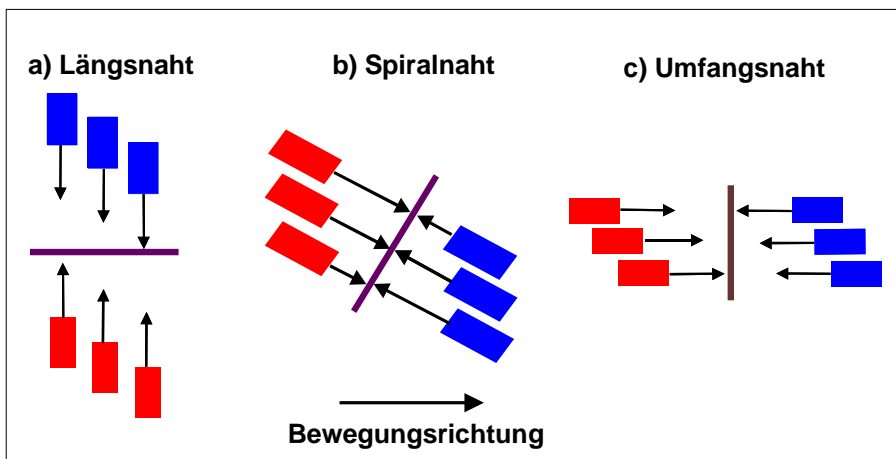
**Abb. 6:** C-Bilder Wanddickenmessung (oben) und Rissprüfung (unten) von derselben Stelle einer 36"-Fernleitung. Aus der Kombination der Daten ist eine großflächige Korrosion in Verbindung mit Rissfeldern erkennbar.

#### 4.3 Prüfung auf Umfangsrisse

In Rohrleitungen hat unter normalen Beanspruchungsbedingungen (Belastung durch Innendruck) die Spannungskomponente in Umfangsrichtungen den größten Wert. Dies hat zur Folge, dass durch Betriebsbedingungen verursachte Risse (z.B. Ermüdungsrisse) in der

Regel in Längsrichtung orientiert sind. Rissprüfmolche sind deshalb normalerweise für die Detektion von Längsrissen ausgelegt. Zusatzbeanspruchungen wie z.B. Biegemomente können unter Umständen jedoch auch die Entstehung von Rissen in Umfangsrichtung bzw. das Wachstum bereits vorhandener rissähnliche Fehler bewirken (z.B. in Umfangsschweißnähten). Um auch in solchen Fällen eine Inline-Prüfung durchführen zu können, wurde das Konzept der Längsfehlerprüfung auf die Querfehlerprüfung übertragen. Dies erforderte insbesondere Anpassungen bzgl.

- Sensorträger (Anpassung der Einschallrichtungen, s. Abb. 9)
- Online-Datenverarbeitung und
- Auswertesoftware.



**Abb. 9:** Prüfkopfanzordnung in Abhängigkeit von der Prüfaufgabe

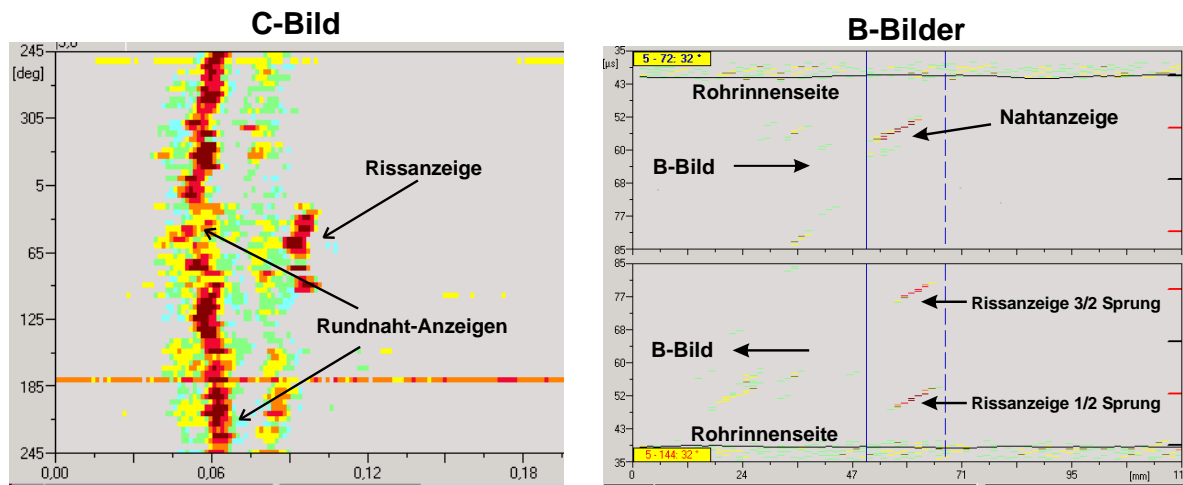
Das Konzept wurde inzwischen realisiert und erfolgreich in der Praxis eingesetzt [7]. Für die Querfehlerprüfung in 10"-Leitungen wurde der in Abb. 10 gezeigte Sensorträger entwickelt. Eine Erweiterung des Konzepts zur Prüfung auf rissartige Fehler an Spiralnahten wurde ebenfalls umgesetzt (Prinzip s. Abb. 9b).



**Abb. 10:** 10"-Sensorträger für die Inline-Prüfung auf Umfangsrissen. Die Einschallung erfolgt in Laufrichtung bzw. in die dazu entgegengesetzte Richtung.

Ein Beispiel zu einem mit diesem Prüfsystem detektierten Ermüdungsriss in der Wärmeinflusszone einer Rundnaht ist in Abb. 11 dargestellt. Durch geeignete Gegenüberstellung der Anzeigen aus den beiden Einschallrichtungen können hier von der Naht verursachte Formanzeigen und Fehleranzeigen zuverlässig unterschieden werden.





**Abb. 11:** C-Bild bzw. B-Bilder mit Anzeigen eines in Umfangsrichtung verlaufenden Ermüdungsrisse (s. oberes Teilbild, die Rissfläche ist rot markiert) in einer 10"-Leitung. Fehleranzeigen bzw. durch die Rundnaht verursachte Formanzeigen können über unterschiedliche, von der Einschallrichtung abhängige Signalmuster zuverlässig unterschieden werden.

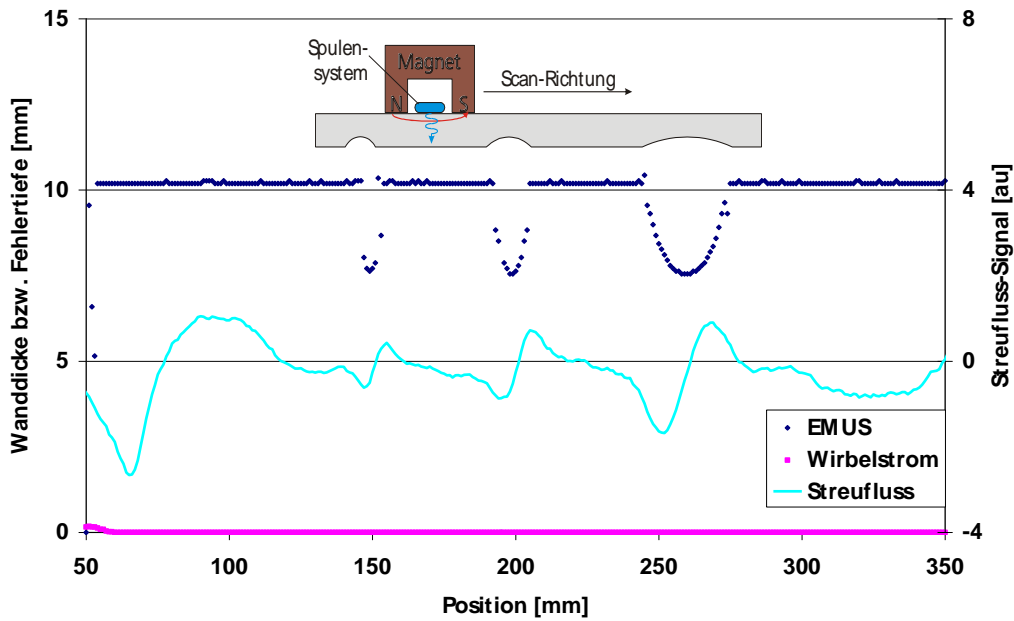
#### 4.4 Wanddickenmessung in Gasleitungen

Eine große Einschränkung für den Einsatz der (konventionellen) Ultraschalltechnik zur Inline-Rohrleitungsprüfung ist die Notwendigkeit eines flüssigen Ankoppelmediums. Während in Flüssigkeitsleitungen in der Regel das Medium selbst (Rohöl, Diesel etc.) zur Ankopplung benutzt wird, ist die Prüfung von Gasleitungen damit nicht möglich, da über das Medium Gas keine für die praktische Anwendung genügende Übertragung von Schallenergie in die Rohrwand erreicht wird. Deswegen werden Gasleitungen üblicherweise mit Streuflussmolchen inspiziert. Der Hauptnachteil des Streuflussverfahrens ist allerdings, dass damit keine direkte Wanddickenmessung möglich ist und deshalb die Genauigkeit des Ultraschallverfahrens zur Fehlermessung (insbesondere Fehlertiefe) nicht erreicht wird.

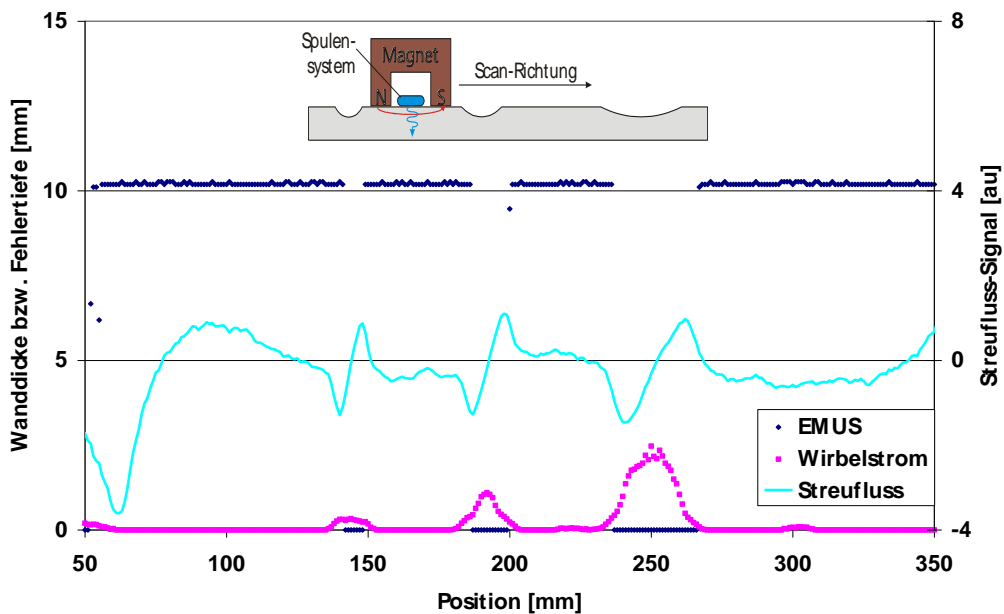
Um die Vorteile des Ultraschallverfahrens auch für Gasleitungen nutzbar zu machen, wurde ein Konzept auf Basis von EMUS-Wandlern erstellt, das sich derzeit in der Umsetzungsphase befindet. Mittels der EMUS-Technik kann Ultraschall ohne Koppelmedium über elektromagnetische Wechselwirkungen berührungslos in der Wandoberfläche erzeugt werden. Dazu werden für den jeweiligen Anwendungsfall optimierte Spulen eingesetzt. Neben dem Erzeugen und Empfangen von Ultraschall können diese Spulen in der vorliegenden Anwendung gleichzeitig auch als Wirbelstrom- und Streuflusssonde genutzt werden [8,9].

Die Abbildungen 12,13 zeigen Ergebnisse, die mit diesem neuen Sensorkonzept an künstlichen, kalottenförmigen Materialverlusten mit Längen von 10 mm, 15 mm und 30 mm aufgezeichnet wurden. Zur Simulation von Außen- bzw. Innenfehlern wurde das Prüfobjekt von beiden Seiten gescannt. Bei der EMUS-Messung wurden die Fehlertiefen

für alle Außenfehler korrekt aus der Laufzeit des Rückwandechos bestimmt. Innenfehler werden über den EMUS-Sensor nicht erkannt, da das Ultraschallsignal aufgrund der Spulenanhebung zu sehr abgeschwächt wird. Die Fehlerlänge kann jedoch anhand der Ausdehnung des Signalverlustes ermittelt werden. Die Wirbelstrom-Methode hingegen erkennt alle Innenfehler; jedoch keine Außenfehler, da nur der Abhebeeffect ausgewertet wird. Dieser hängt direkt mit der Fehlertiefe zusammen. Über eine Kalibrierkurve wird die Fehlertiefe aus dem Messsignal ermittelt. Die angezeigte Tiefe ist jedoch nur für den Fall Fehlerlänge  $\gg$  Sondenabmessung korrekt, da bei kleinen Fehlerlängen der integral über die Sensorapertur gemessene Wert verfälscht wird. Das Streuflusssignal ist in den Abbildungen entsprechend der Originalaufzeichnung dargestellt.



**Abb. 10:** Simultane Ultraschall-, MFL- und Wirbelstrom-Messung an externen Materialverlusten



**Abb.11:** Simultane Ultraschall-, MFL- und Wirbelstrom-Messung an internen Materialverlusten

Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, erlaubt der Einsatz dieses Kombinationsverfahrens eine redundante Detektion und Vermessung von Materialverlusten entsprechend Tabelle 4. Weitere Vorteile sind, dass weder eine separate Anregung für die Wirbelstrommessung noch eine separate Spule für die Streuflussmessung erforderlich sind.

**Tabelle 4.** Vermessung (Länge, Tiefe) von Materialverlusten mittels Kombi-Sensor

Verfahren	Innenfehler		Außenfehler	
	Längenmessung	Tiefenmessung	Längenmessung	Tiefenmessung
<i>EMUS</i>	direkt	/	direkt	direkt
<i>Wirbelstrom</i>	direkt	indirekt	/	/
<i>Streufluss</i>	direkt	indirekt	direkt	indirekt

## 5. Ausblick

Maßgeblich für den Fortschritt bei der Inline-Inspektion von Pipelines ist auch zukünftig zum einen die Verfügbarkeit immer kleinerer und leistungsfähigerer Elektronik- und Datenverarbeitungskomponenten und zum anderen der Einsatz fortschrittlicher Sensortechnologien. Die Konsequenzen, die sich daraus ergeben, betreffen sowohl die Ausweitung der Einsatzbereiche als auch Verbesserungen in der Prüfaussage. Als Beispiele für Entwicklungstendenzen aus dem Bereich der Ultraschalltechnik seien genannt:

- Erweiterung des Einsatzbereiches auf kleinere Leitungsdurchmesser und extremere Umgebungsbedingungen (höhere Drücke, höhere Temperaturen)
- Erweiterung der Korrosions- und Rissprüfung auf Gaspipelines durch Einsatz von EMUS-Technologie
- Kombination mehrerer Prüfaufgaben (z.B. Quer- und Längsrissprüfung) oder Prüftechnologien (z.B. Ultraschall und Wirbelstrom) in einem Prüfsystem

## Referenzen

- [1] B. Skerra (Edit.), Handbook PIG Technology (in German), Vulkan Publishing House, Essen, 2000.
- [2] H. Willems, G. Bach und O.A. Barbian, Risse finden in Pipelines - eine neue Generation intelligenter Molche, PREUSSAG-Schriftenreihe "Forschung, Planung und Betrieb"; Band 20, 1995.
- [3] H. Willems, O.A. Barbian, and N.I. Uzelac. Internal Inspection Device for Detection of Longitudinal Cracks in Oil and Gas Pipelines - Results from an Operational Experience, ASME International Pipeline Conference, Conf. Proc., Calgary, June 9 - 14, 1996.
- [4] H. Willems, O.A. Barbian und W. Bähr, Moderne Konzepte der automatisierten Ultraschallprüfung am Beispiel der Inspektion von Fernrohrleitungen, DGZfP-Seminar Modernisierung in der zfP mit Ultraschall zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Prüfaussagen, Saarbrücken, 3./4. November 2003.
- [5] O.A. Barbian et al., Handbook Automated Ultrasonic Testing Systems, IIW Handbook, DVS Verlag, Berlin 2004.
- [6] R. Vogel et al., Combined Metal Loss and Crack Inspection of a Gas Pipeline utilizing Ultrasound Technology, Pipeline Pigging & Integrity Management Conference, Conference Proceedings, Houston, February 14 - 15, 2007.
- [7] H. Willems, M. Nadler, M. Werle, and O.A. Barbian, First experiences with ultrasonic in-line detection of circumferential cracks in pipelines, Corrosion 2006, NACE Internationals 61th Annual Conference, Conf. Proc., San Diego, March 12 - 16; 2006.
- [8] F. Niese, A. Yashan and H. Willems, 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, Conf. Proc., Berlin, September 25 - 29; 2006.
- [9] A. Yashan, H. Willems, and F. Niese, Method and System for Non-Destructively Testing a Metallic Workpiece, International Patent Application WO 2007/068327 A1, 2007.