

# Ultraschallprüfung mit Phased Arrays oder konventionell: Eine Analyse auf der Basis von Industrie-Prüfanlagen für geschweißte Rohre

**Wolfram A. Karl Deutsch, Mathias Razeng, Werner Roye, Klaus Maxam, Peter Schulte**  
KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG  
Otto-Hausmann-Ring 101, 42115 Wuppertal  
Tel. (0202) 7192-185, Fax (0202) 714-932, [info@karldeutsch.de](mailto:info@karldeutsch.de), [www.karldeutsch.de](http://www.karldeutsch.de)

**Kurzfassung.** Drei Typen geschweißter Rohre werden häufig mit Ultraschall geprüft: Unterpulvergeschweißte Rohre mit Längs- oder Spiralnähten und widerstandsgeschweißte Rohre. In dieser Arbeit wird die Online-Prüfung von widerstandsgeschweißten Rohren behandelt.

Zunächst wird der Stand der Technik der mehrkanaligen Ultraschallprüfung zusammengefasst. Danach werden neuere Entwicklungen der Ultraschallprüfung mit Phased Arrays (PAUT) vorgestellt. Die Optimierung des PA-Prüfkopf-Designs und die Parametrierung komplexer Prüfkonfigurationen erfolgt mit Hilfe der Simulationssoftware CIVA. Beispiele industrieller Prüfanlagen mit einer großen Anzahl von parallelen Kanälen werden beschrieben. Die Leistungsfähigkeiten (Signal-Rausch-Abstand, Prüfgeschwindigkeit, Ultraschall-Abdeckung u.s.w.) der konventionellen Ultraschallprüfung und PAUT werden verglichen. Als Ergebnis wird zusammengefasst, dass eine Kombination der Vorteile beider Techniken sinnvoll ist.

## Die Ultraschallprüfung von widerstandsgeschweißten Rohren

Die zerstörungsfreie Prüfung wird schon während der Produktion von widerstandsgeschweißten Rohren eingesetzt, um rechtzeitig Informationen über den Schweißprozess zu erhalten. Zum Abschluss wird das fertige Rohr geprüft. Wenn die Wanddicke zu groß für die Wirbelstromprüfung ist und wenn die strengen Spezifikationen der Öl- und Gasindustrie erfüllt werden müssen, dann ist die Prüfung mit Ultraschall unabdingbar.

Vier Ultraschallsysteme werden während des Produktionsprozesses eingesetzt: Im ersten Schritt wird das Band mit feststehenden oder oszillierenden Prüfköpfen geprüft. In neueren Projekten wurde die komplette Abdeckung des Bandes mit linearen Prüfspuren und einer großen Anzahl von feststehenden Prüfköpfen realisiert. Direkt nach dem Schweißen werden die erste Schweißnahtprüfung und die interne Schabekontrolle online mit 4 Prüfköpfen durchgeführt: 2 von jeder Seite für interne und externe Längsfehler. Manchmal wird auch eine oszillierende Schabekontrolle zur Überprüfung der internen Entgratung vorgenommen. Nach der Glühung, der mechanischen Bearbeitung und der

Wasserdruckprüfung erfolgt die abschließende Schweißnahtprüfung offline; üblicherweise mit einem Prüfportal und einem beweglichen Sensorschlitten. Das Prüfportal hat den Vorteil, dass das Rohr nicht bewegt werden muss. Dadurch entfallen Vibrationen, die die Prüfqualität beeinträchtigen können. Die Rohrenden werden in derselben Anlage oder auch separat geprüft.



Abb. 1: Portal für die Offline-Schweißnahtprüfung

Alternativ zur Bandprüfung kann auch das komplette Rohrvolumen geprüft werden. Dafür wird entweder das Offline-Portal mit zusätzlichen Volumenprüfköpfen ausgestattet oder die Prüfung erfolgt mit einem separaten Prüfsystem.

### Die konventionelle Online-Prüfung von widerstandsgeschweißten Rohren

Während der Prüfung befindet sich die Schweißnaht in der 12-Uhr-Position. Bei der automatischen Schweißnahtprüfung werden 2 Prüfkopfpaare auf die Schweißnaht ausgerichtet. Geprüft wird im Puls-Echo-Modus zum Nachweis interner und externer Längsfehler. Zusätzlich wird das Signal von einer V-Durchschallung für die Ankopplungsüberwachung und den allgemeinen Funktionscheck genutzt.

Mit einem oszillierenden Senkrechtprüfkopf erfolgen die Schabekontrolle und gleichzeitig die Wanddickenmessung in der Schweißzone. Herausforderungen sind hierbei hohe Temperaturen im Schweißbereich und die oft vorhandene Unrundheit der Rohre, wobei sich ungenaue Wanddickenmessungen ergeben können, wenn der Schall nicht genau senkrecht auftrifft.

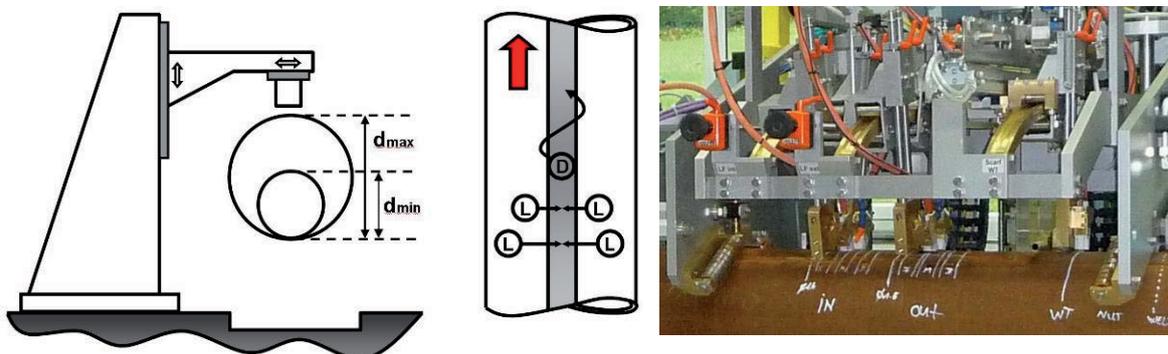
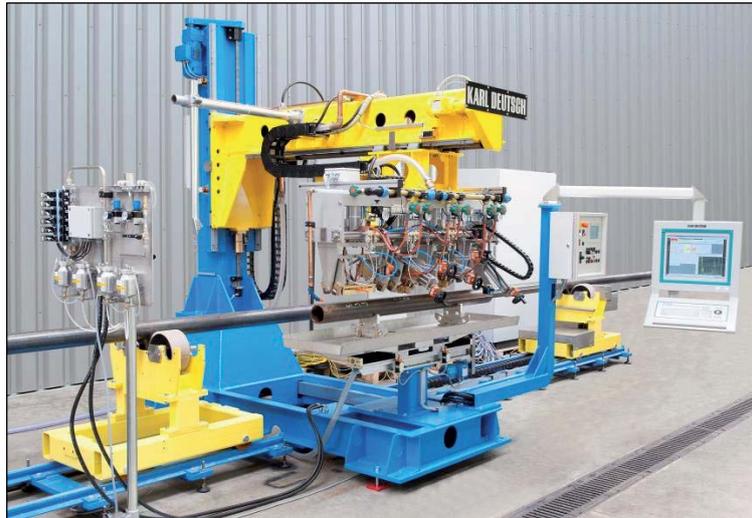


Abb. 2: Konventionelle Online-Schweißnahtprüfung mit fünf Ultraschallprüfköpfen

Die Ankopplung erfolgt über einen Wasserstrahl mit einem Abstand zwischen Prüfkopf und Rohroberfläche im Bereich von einigen Zentimetern. Das ist vorteilhaft im Hinblick auf den Verschleiß von Prüfkopf und Halterung. Der jeweils erforderliche Winkel lässt sich stufenlos in der Halterung justieren – im Gegensatz zur Wasserspaltankopplung, bei der der Winkel innerhalb der Halterung fixiert ist. Im Fall von unebenen Rohroberflächen wird

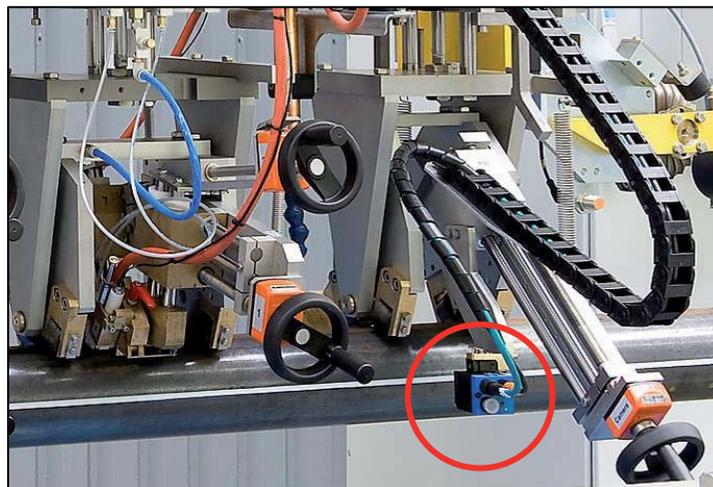
über den Wasserstrahl eine stabile Ankopplung realisiert. Darüber hinaus schützt der Wasserstrahl den Prüfkopf vor Beschädigungen durch hohe Temperaturen.

Die Online-Prüfmechanik besteht aus einem stabilen Rahmen, einem horizontalen Ausleger und die Prüfkopfhalterungen. Die Höhe des Auslegers kann dem Rohrdurchmesser über einen vertikalen Antrieb angepasst werden, und über einen horizontalen Antrieb lassen sich die Prüfkopfhalter zwischen der Testposition (online) und der Kalibrierposition (offline) verschieben. Auf dem motorisierten Tisch der Kalibrierstation befindet sich das Testrohr mit künstlichen Fehlern. Das ermöglicht die dynamische Überprüfung der Prüfempfindlichkeit. Das Wasser für die Ankopplung wird über ein Zirkulationssystem zurückgeführt.



*Abb. 3: Konventionelle Online-Schweißnahtprüfanlage, hier mit einer anderen Prüfkopfanzordnung*

Während der Prüfung müssen die Prüfköpfe symmetrisch zur Schweißnaht geführt werden, um einen zuverlässigen Fehlernachweis sicherzustellen. Weil die Schweißnaht keine erhabene Decklage besitzt, erfolgt die Schweißnahtverfolgung mit Hilfe einer gezeichneten so genannten „Pilot-Linie“ – typischerweise in der 3-Uhr-Position bezogen auf die 12-Uhr-Position der Schweißnaht. Die Position der Pilotlinie wird mit einer CCD-Kamera erfasst. Eine entsprechende Software zur Ansteuerung eines Siemens-PLC-Antriebs sorgt dann für die richtige Ausrichtung der Prüfköpfe. Die Kamera ist mit einer LED-Strobe-Beleuchtung ausgestattet, sodass auch ungünstige Lichtverhältnisse die Funktion nicht beeinträchtigen. Die erzielbare Positioniergenauigkeit liegt bei  $\pm 2$  mm.



*Abb. 4: Schweißnahtverfolgungssystem (Kreis) an der Eintrittsseite der Prüfanlage*

Die Vorteile einer konventionellen Prüfanlage mit Wasserstrahlankopplung sind:

- Kleine Anzahl von Prüfkanälen, relativ preisgünstige Prüfelektronik
- Kleine Anzahl relativ preiswerter Prüfköpfe
- Hohe Prüfkopflebensdauer aufgrund der kühlenden und reinigenden Wirkung durch das Wasser auch in der Nähe der heißen Schweißnaht
- Zuverlässige Ankopplung aufgrund des kleinen Prüfkopf- und Wasserstrahldurchmessers
- Beliebige Einschallwinkel ohne Prüfkopf- und Mechaniktausch einstellbar
- Kein Mechanikwechsel für den gesamten Rohrdurchmesser- und Wanddickenbereich

### **Phased Array Online-Schweißnahtprüfung von widerstandsgeschweißten Rohren**

Die Prüfspezifikationen für widerstandsgeschweißte Rohre beschreiben die nachzuweisenden Testfehler, wie interne und externe Nuten – meist in Längsrichtung – und senkrechte Durchgangsbohrungen. Die Testfehlergrößen (Nutlänge, Nuttiefe und Bohrungsdurchmesser) sind gemäß den Anforderungen festgelegt. Die Spezifikationen regeln aber nicht, ob konventionelle oder Phased Array - Technik eingesetzt wird. Einige besondere Merkmale der Phased Array - Technik werden im Folgenden beschrieben.

Die Prüfaufgabe war ähnlich, d. h. Schrägeinschallung in Umfangsrichtung und Senkrechteinschallung. Anstelle von 5 konventionellen Sensoren wurden 3 PA-Prüfköpfe eingesetzt. Der Rohrdurchmesserbereich lag zwischen 140 und 340 mm. Es wurde gewünscht, dass der komplette Durchmesserbereich mit denselben PA-Sensoren geprüft werden soll. Um die erforderlichen Schwenkwinkel zu reduzieren und um eine höhere Prüfeempfindlichkeit zu erzielen, wurden gekrümmte Arrays vorgesehen. Die Optimierung des geeigneten Prüfkopfdesigns erfolgte mit Hilfe der CIVA-Simulation. Weil jede aktive Schwingergruppe innerhalb des PA-Prüfkopfes unterschiedliche Verzögerungszeiten erfordert, musste eine sehr leistungsstarke PA-Elektronik eingesetzt werden. Um sehr große Arrays zu vermeiden, wurde auch hier ein System für die Nahtverfolgung verwendet (ähnlich wie bei dem konventionellen System).

Der Kunde wünschte die Einschallwinkel  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $70^\circ$  und die Tandemprüfung zum Nachweis von Bindefehlern in der Schweißnahtmitte. Grundsätzlich lässt sich das mit der PA-Technik leicht einrichten. Allerdings müssen für die verschiedenen Prüfaufgaben die akustischen Parameter insbesondere auch im Hinblick auf die Prüfgeschwindigkeit genau berechnet werden. KARL DEUTSCH verfügt über die Vollversion der CIVA-Simulationssoftware. Damit können nicht nur die Schallfeldparameter berechnet werden, sondern auch die Impulsantworten von virtuellen Testfehlern, die dann später mit den experimentellen Ergebnissen verglichen werden können.

Der mechanische Aufbau ist vergleichbar mit dem konventionellen Prüfsystem. Ein mechanischer Antrieb mit Positionsanzeige führt den PA-Prüfkopf in die richtige Ausrichtung bezüglich der Schweißnaht. Die Ankopplung erfolgt über eine Wasserkammer zwischen PA-Prüfkopf und Rohroberfläche. Die Geometrie der Wasserkammer ist von großer Bedeutung. Schallfelddurchmesser, Einschallwinkel und Schallfeldnebenkeulen müssen berücksichtigt werden. Der Radius der Wasserkammerdüse muss dem Rohrradius angepasst sein, weswegen die Düsen jeweils für die verschiedenen Rohrdurchmesser ausgetauscht werden.

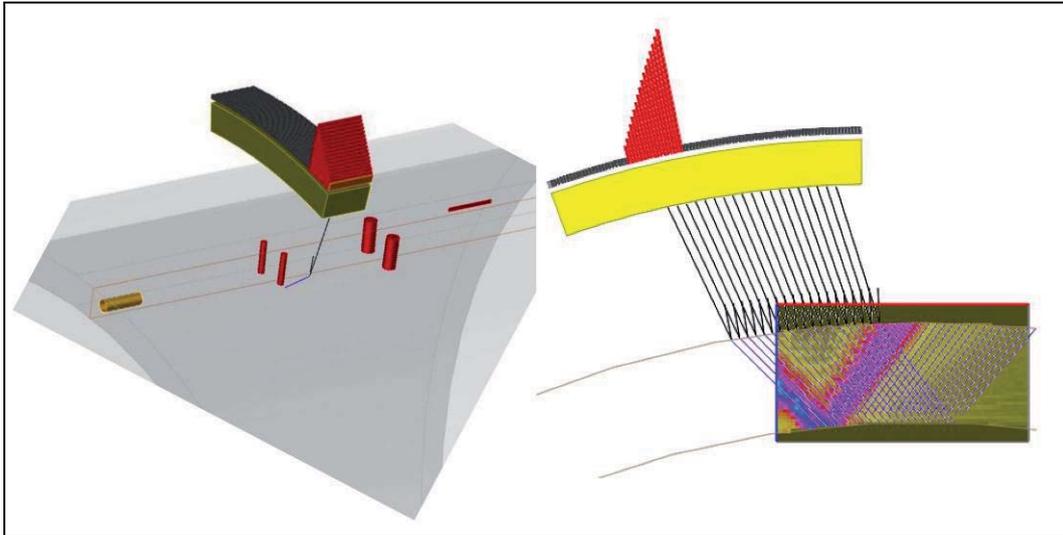


Abb. 5: CIVA-Modellierung für die Schrägeinschallung in Schweißnähte

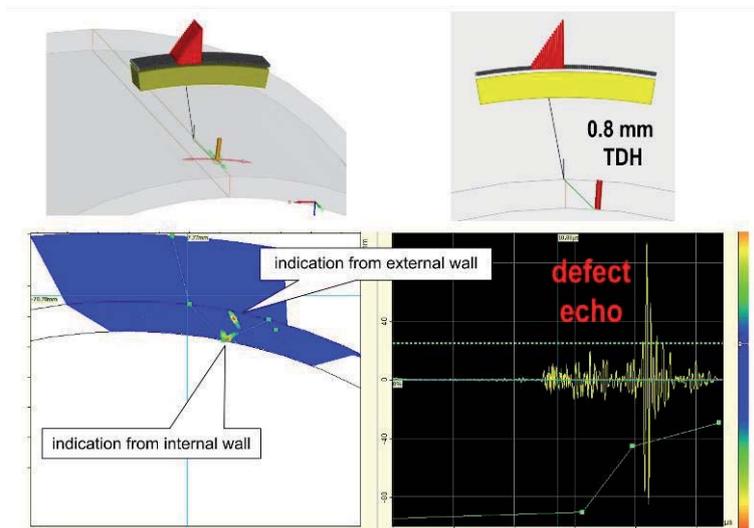


Abb. 6: Experimentelles Ergebnis zur Schrägeinschallung. Eine 0,8-mm-Durchgangsbohrung wird einwandfrei nachgewiesen

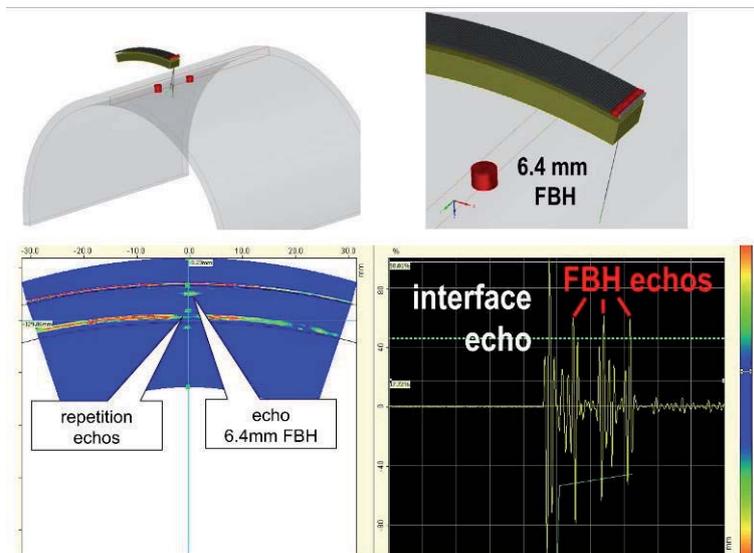
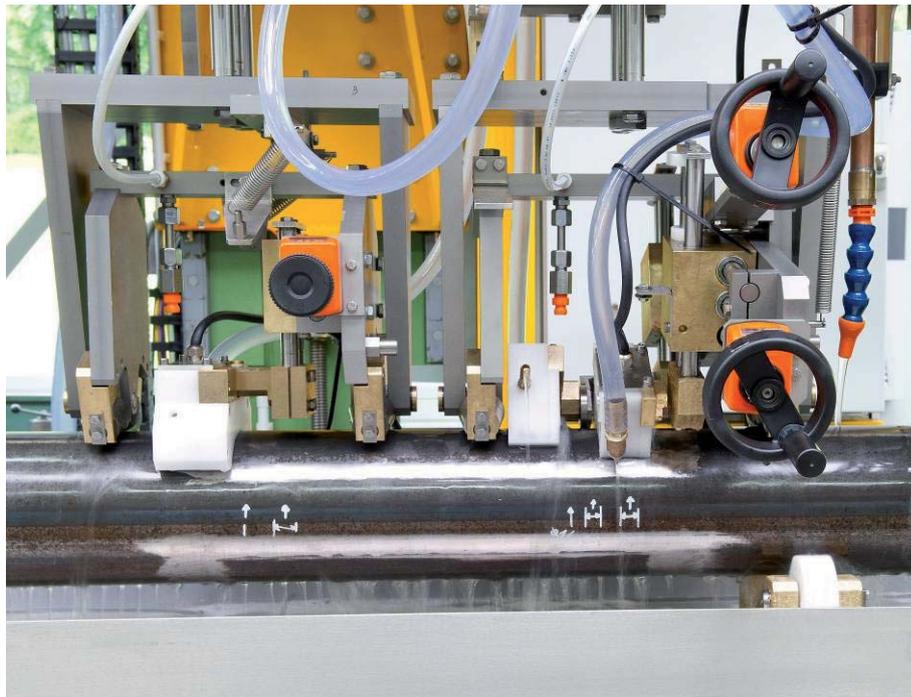


Abb. 7: Experimentelles Ergebnis zur Senkrechteinschallung. Wanddickenmessung und Nachweis einer 6,4-mm-Flachbodenbohrung



**Abb. 8: Phased Array - Prüfkopfhalterung mit Wasserdüsen (weiß)**

Seit 2009 besitzt KARL DEUTSCH 33,4% der französischen Firma M2M, die die Prüfelektronik geliefert hat. Zwei Einheiten mit insgesamt 320 Kanälen steuern drei Prüfkopfarrays. Die hohe Anzahl der Prüfkanäle gestattet eine sehr flexible Steuerung der Verzögerungszeiten, eine parallele Anregung verschiedener aktiver Wandlergruppen innerhalb eines Arrays und dadurch eine sehr hohe Prüfgeschwindigkeit. Trotzdem ist die Elektronik sehr kompakt und erfordert nur einen kleinen Schrank, der an die Prüfanlage montiert ist. Das Prüfsystem generiert die Ergebnisse parallel und in Echtzeit in verschiedenen Darstellungsformen (mehrfache A-, B- und C-Bilder) und eine Stripchart der Amplituden über der Rohrlänge (wie beim konventionellen System).



**Abb. 9: Phased Array - Prüfsystem vor dem Versand im Anlagenbau von KARL DEUTSCH**

Im folgenden Screenshot werden die Ergebnisse der Senkrechteinschallung zur Wanddickenmessung und Dopplungsprüfung und der Schrägeinschallung für die Längsfehlerprüfung vorgestellt.

1. Zeile:

Ergebnis der Senkrechteinschallung als B-Bild, A-Bild und Stripchart

Zeilen 2 und 4:

C-Bilder von der Längsfehlerprüfung mit Schrägeinschallung von rechts und links (Long1 und Long2). Hier scheinen zwar die C-Bilder anstelle der Längsfehler Querfehler darzustellen, das ist aber auf die gestauchte Skalierung in Längsrichtung zurückzuführen. Innen- und Außenfehler werden getrennt dargestellt (L1i und L1e bzw. L2i und L2e)

Zeilen 3 und 5:

Stripcharts von der Längsfehlerprüfung

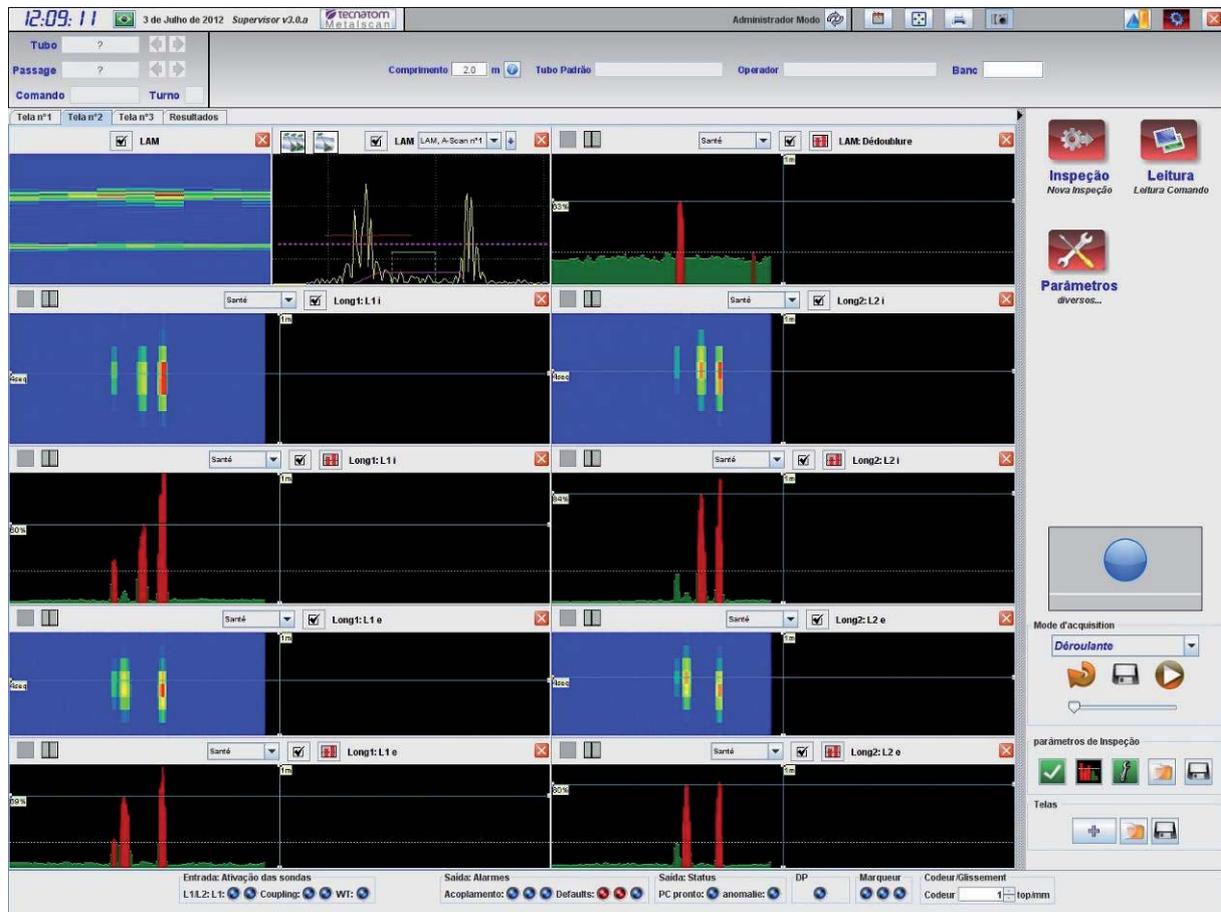


Abb. 10: Darstellung der Phased Array - Ergebnisse parallel und in Echtzeit.

Die Vorteile des Phased Array - Prüfsystems sind:

- Reduzierung der Prüfmechanik durch Verwendung von weniger Prüfköpfen
- Verschiedene Einschallwinkel und Tandemprüfung mit demselben Prüfkopf
- Großer Prüfbereich aufgrund der Array-Größe. Das Auswandern der Schweißnaht ist daher weniger kritisch.
- B-Bild-Darstellung als Querschnittsansicht
- C-Bild-Darstellung der Senkrechprüfung, gute Visualisierung der Schabekontrolle

## Ausblick

In einem nächsten Schritt wird ein Phased Array Offline-Portal gebaut. Dabei ist die geforderte Prüfgeschwindigkeit deutlich höher als bei der Online-Prüfung. Es werden Prüfgeschwindigkeiten bis 1,5 m/s angestrebt. Aus diesem Grund werden dabei kleinere Gruppenstrahler eingesetzt.

## Referenzen

- [1] Deutsch, Volker, Michael Platte and Manfred Vogt: „Ultraschallprüfung – Grundlagen und industrielle Anwendungen (Ultrasonic Testing – Principles and Industrial Applications)“, 372 Seiten, *Springer Publishing House*, 1997.
- [2] Deutsch, Volker, Michael Platte, Manfred Vogt, Wolfram Deutsch and Volker Schuster: „Ultrasonic Testing – Compact & Understandable“, 77 Seiten, *Castell Publishing House Wuppertal*, 2002.
- [3] Deutsch, Wolfram: „Automated Ultrasonic Inspection – Examples from the Steel Mill“, *WCNDT World Conference for Nondestructive Testing*, Rome, Italy, 2000.
- [4] Möller, Peter: „Ultrasonic Testing Applications with Probe Holders with Water Jet Coupling (Ultraschall-Prüfanwendungen mit Prüfkopfträgern für die Wasserstrahl-Ankopplung)“, *DGZfP Conference Proceedings*, Garmisch, Seiten 109-117, 1993.
- [5] Deutsch, Wolfram: „Automated Ultrasonic Pipe Weld Inspection“, *WCNDT World Conference for Nondestructive Testing*, Shanghai, China, 2008.
- [6] Deutsch, Wolfram, Michael Joswig, Klaus Maxam, Stefan Nitsche, Michel Vahe, Alexandre Noël, Patrick Pichard and Sylvain Deutsch, „Phased Array Ultrasonic Testing of Heavy-Wall Seamless Tubes by Means of a Testing Portal“, *WCNDT World Conference for Nondestructive Testing*, Moscow, Russia, 2010.
- [7] Deutsch, Wolfram, Martin Gessinger and Michael Joswig: „ECHOGRAPH Ultrasonic Testing of Helical Submerged Arc-Welded (HSAW) Pipes“, *WCNDT World Conference for Nondestructive Testing*, Durban, South Africa, 2012.