

Schnelle Phased-Array-Prüfung von dickwandigen, nahtlosen Rohren mit verbesserter Schrägfehlerprüfung

Dr. Wolfram DEUTSCH¹, Cristian DRÎNCIU², Gabriela BĂRBULESCU²,
Silviu BĂRBULESCU², Jörn BOLTEN¹, Daniel COMUZZI¹, Michael JOSWIG¹,
Patrick PICHARD¹, Helge RAST¹, Mathias RAZENG¹, Timur SAYFULLAEV¹,
Daniel SCHAEFERS¹, Simon STEVES¹, Raimund ZEMAN³

¹ KARL DEUTSCH, Wuppertal

² TMK ARTROM, Slatina, Rumänien

³ SOLUȚII CND, Bukarest, Rumänien

Kontakt E-Mail: w.deutsch@karldeutsch.de

Kurzfassung. Bei der Herstellung vergüteter, dickwandiger Rohre können Inhomogenitäten in jeder Orientierung entstehen. Deshalb müssen bei der Ultraschallprüfung dieser Rohre neben Längs- und Querfehlern auch schrägliegende Fehler detektierbar sein.

In diesem Beitrag wird eine erweiterte Phased-Array-Technik vorgestellt, bei der die Schallbündel so geschwenkt werden, dass auch Schrägfehler bis $\pm 75^\circ$ an standard- und dickwandigen Stahlrohren nachgewiesen werden können. Es wird eine Prüfbrücke mit schraubenförmigen Prüfspuren beschrieben, bei der sich das Rohr dreht und die Prüfköpfe linear verfahren werden.

Die Prüfanlage ist für den Nachweis von Längs-, Quer- und Schrägfehlern, Dopplungen und zur Wanddickenmessung ausgelegt. Dafür werden hochempfindliche Phased-Array-Prüfköpfe in mehreren Prüfkopf-Clustern verwendet.

Hervorragende Testergebnisse mit hoher Empfindlichkeit und zuverlässigem Signal-Rausch-Verhältnis konnten erzielt werden. Darüber hinaus ist bei dickwandigen Rohren die Optimierung der Einschallwinkel und ggf. der Einsatz von modenkonvertierten Wellen zur Erkennung von Innen- und Außenfehlern unerlässlich.

Es kommen mehrere parallele PAUT-Elektronikmodule zum Einsatz. Eine hohe Prüfgeschwindigkeit mit parallelen Schussfolgen und mehreren parallelen Berechnungen im Empfangsmodus sind wichtige Merkmale. Daher können hohe Empfindlichkeit, Wiederholbarkeit und Produktivität für den gesamten Durchmesser- und Wanddickenbereich der Rohre gewährleistet werden.

Einführung

Die Firma TMK-ARTROM ist ein weltweit führender Hersteller von nahtlosen Rohren mit Sitz in Slatina, Rumänien. Im Jahr 2018 wurde eine neue hochmoderne Wärmebehandlungsanlage mit einer Produktionskapazität von 165.000 Tonnen pro Jahr in Betrieb genommen. Die neue, fortschrittliche Anlage dient der Fertigung von Rohren mit



Durchmessern von 60 mm bis 273 mm und Wanddicken von 5 mm bis 60 mm. Die hohen Wandstärken sind bezüglich der Ultraschallprüfung eine besondere Herausforderung. Die Rohrlängen betragen zwischen 3,5 m und 14 m.

Solche hochwertigen Stahlrohre sind für anspruchsvolle Anwendungen in den Bereichen Maschinenbau, Automotive, Hochleistungshydraulik und Energieerzeugung vorgesehen. Der sichere Einsatz dieser Rohre erfordert strenge zerstörungsfreie Prüfungen. Bei der Herstellung von vergüteten, dickwandigen Rohren können Fehlstellen jeglicher Orientierung auftreten, was eine Ultraschallprüfung mit mehr Einschallwinkeln erforderlich macht.

Derzeit wird die Prüfung auf Schrägfehler mit einigen diskreten Orientierungen von internationalen Standards und den Spezifikationen der wichtigsten Endverbraucher für nahtlose Rohre empfohlen oder vorgeschrieben. Es ist zu erwarten, dass zukünftige Normen einen immer größeren Schrägfehlerwinkelbereich einfordern werden. Die neue Ultraschallprüfanlage wurde daher für Schrägfehler bis $\pm 75^\circ$ auf den Außen- und Innen-Rohroberflächen ausgelegt. Die Prüfanlage weist eine Produktivität auf, die dem Durchsatz der neuen Wärmebehandlungsanlage entspricht.

Die Firma KARL DEUTSCH wurde mit der Entwicklung dieser komplexen Ultraschallprüfanlage beauftragt, die im zweiten Halbjahr 2021 in Betrieb genommen werden soll. Der After-Sales-Service wird durch die Firma Soluții CND in Bukarest, Rumänien, gewährleistet.

1. Historie der PAUT-Prüfung für Rohre mittlerer Abmessungen

Phased-Array-Prüfköpfe mit der Möglichkeit zur elektronischen Fokussierung und Winkelsteuerung bieten interessante Vorteile für die Online-Inspektion von Rohren. Die Anordnung linearer Phased-Array-Prüfköpfe, die parallel zur Rohrachse ausgerichtet sind, hat sich als robuste und äußerst vielseitige Lösung erwiesen. Die Länge der Prüfköpfe korrespondiert mit der Prüfspurbreite der Helix, mit der die Rohre abgetastet werden. Die ersten Prüfanlagen solchen Typs mit mindestens drei linearen Phased-Array-Prüfköpfen wurden Anfang der 2000er-Jahre vorgestellt [1], [2]. Erstmals war eine Schrägfehlerprüfung mit hoher Produktivität erzielbar, wobei der Bereich der Schrägfehlerwinkellagen noch eingeschränkt war.

In den Folgejahren wurde die Anzahl der Prüfköpfe erhöht und damit auch der Bereich für die Schrägfehlerprüfung. Dies wurde auch möglich durch leistungsfähigere Prüfelektroniken, die eine quasi lückenlose Schrägfehlerprüfung bis $\pm 45^\circ$ ermöglichen [3]-[6]. Die Prüfköpfe für die Querfehlerprüfung und die Senkrechteinschallung wurden separiert. Ein kleinerer Pitch bei der Querfehlerprüfung sorgte für verbesserte Prüfergebnisse.

In jüngster Zeit wurden auch Lösungen auf Basis von Matrixprüfköpfen vorgestellt, um Fehler aller Orientierungen zu detektieren [7]-[9]. Spezielle Paintbrush-Techniken reduzieren hierbei die benötigte Anzahl von Sendeschüssen. Nachteilig sind die sehr hohen Kanalzahlen und die teuren Matrixprüfköpfe. Auch die Ankopplung solcher großer Prüfköpfe stellt eine Herausforderung dar. Die Rohrabmessungen zeigten normale Wanddicken.

Eine Prüfanlage für sehr dickwandige Rohre mit speziellen Matrixprüfköpfen bei reduzierter Elementanzahl und mit der Möglichkeit, die Einschallwinkel zur Längsfehlerprüfung elektronisch zu verstellen wurde im Jahr 2011 in Betrieb genommen [10], [11]. Diese Anlage verfügte jedoch nicht über Prüfköpfe zur Schrägfehlerprüfung.

2. Umsetzung der PAUT-Rohrprüfung für dickwandige Rohre mit einer ECHOGRAPH-RPTR-PAUT-Anlage bei TMK-ARTROM

Die Machbarkeit des Projekts wurde mit Hilfe einer Versuchsanlage bei KARL DEUTSCH und vielen Testrohren mit typischen Abmessungen verifiziert. Die Prüfkopfhalter wurden komplett neu entwickelt. Die Prüfkopfentwicklung wurde durch hauseigene CIVA-Untersuchungen beschleunigt. Als Besonderheit im Lastenheft sind die Rohrenden zu nennen. Diese können gesägt sein. Es ist aber auch möglich, dass Rohre ungesägt aus dem Walzprozess in die Prüfanlage eingebracht werden. Es ist durch geeignete Stopper sicherzustellen, dass sich die Rohre während der Prüfung nicht in Achsrichtung bewegen.

Um einen möglichst hohen Durchsatz zu gewährleisten, ist die Anlage als Prüfbrücke ausgelegt. Die Rohre werden im Quertransport in die Anlage eingefördert und nach der Prüfung unterhalb der Brücke ausgebracht. Zehn Drehrollenstationen (Abb. 1) waren Teil des Lieferumfangs. Der Vorschub des Prüfschlittens wird über eine Zahnstange präzise eingestellt, um eine 100%ige Überdeckung des Prüfvolumens inkl. 10 % Überlapp der Prüfspuren zu gewährleisten.

Die Prüfanlage ermittelt zunächst die Rohrlänge mit einer anschließenden automatischen Anpassung der Verfahrswege. So können Rohre unterschiedlicher Längen nacheinander effizient geprüft werden.

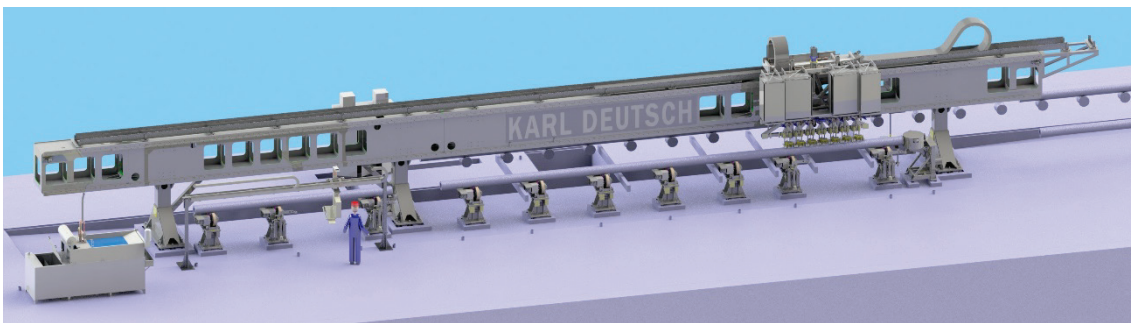


Abb. 1. Prüfbrücke mit einer Länge von 32 m zur schnellen PAUT-Prüfung nahtloser Rohre mit Kalibrierstation (links mit Bediener und drei Rollenböcken) und freitragender Prüfstation (rechts, sieben Rollenböcke)

Die flexiblen Prüfkopfhalter sind kardanisch aufgehängt und weisen drei Freiheitsgrade auf. Dies ist zur Prüfung von Rohren mit größeren Geradheitstoleranzen unerlässlich. Die pneumatische Anstellung (mit einstellbarem Anstelldruck) sorgt für eine zuverlässige Abtastung und Ankopplung. Bis zu acht Cluster mit ein bis zwei Prüfköpfen kommen je nach Rohrabmessung zum Einsatz. Die Cluster sind modular aufgebaut und können untereinander schnell ausgetauscht werden. Die Wassersäule zur Ankopplung wird durch eine akustische Kunststoffmembran im Cluster gehalten. Somit ist nur noch eine Benetzung zur Überbrückung des verbleibenden Wasserspalts erforderlich. Jedes Cluster wird einzeln auf das Rohr abgesenkt bzw. nach der Prüfung angehoben. Ungeprüfte Enden bleiben dadurch möglichst kurz. Die Prüfkopfhalter sind mit gekrümmten Hartmetallkufen ausgestattet, die ungefähr dem Rohrdurchmesser entsprechen. Sie können werkzeuglos und schnell getauscht werden. Die Einschallwinkel der Längs- bzw. Schrägfehlerprüfköpfe können (falls erforderlich) ebenfalls werkzeuglos und schnell verändert werden.

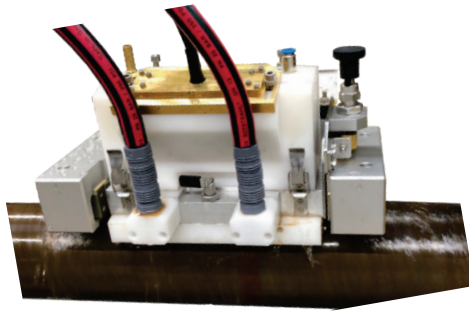


Abb. 2. Prototyp eines Prüfkopfhalters (Clusters) mit einem PAUT-Prüfkopf zur Senkrechteinschallung

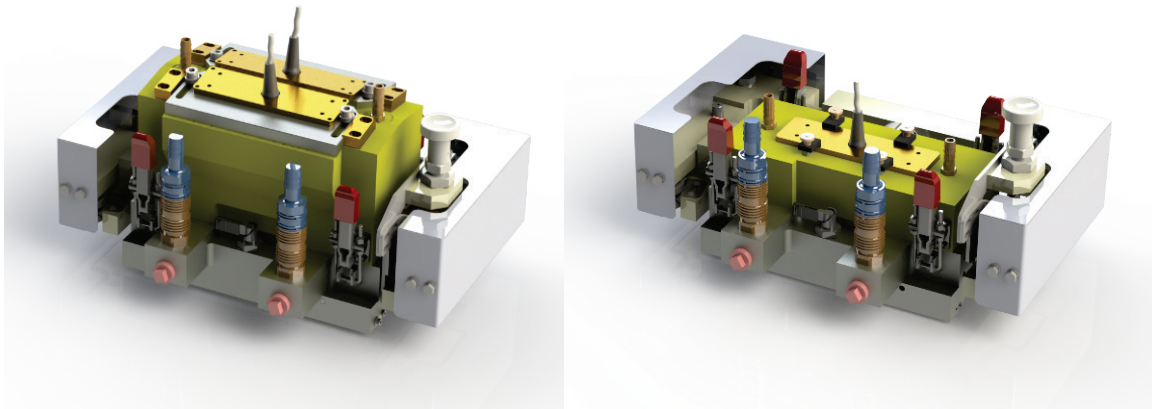


Abb. 3. Prüfkopfhalter mit gekrümmter Gleitkuife (auf der Unterseite und somit nicht sichtbar), Prüfkopfaufnahme mit Wasserdüse (grün), Aluminium-Grundrahmen mit kardanischem Gelenk (3 Freiheitsgrade). Cluster für zwei Prüfköpfe (links) und für einen Prüfkopf (rechts).

Jeder Prüfkopf wird von einer parallelen, leistungsfähigen Prüfelektronik mit jeweils 128 Kanälen angesteuert. Bis zu 12 Elektronikmodule mit insgesamt über 1500 Kanälen sind gleichzeitig im Einsatz. Die kompakten ECHOGRAPH-PAUT-Module sind über kurze Kabellängen mit den Prüfköpfen verbunden und direkt im Prüfwagen oberhalb der Cluster montiert.

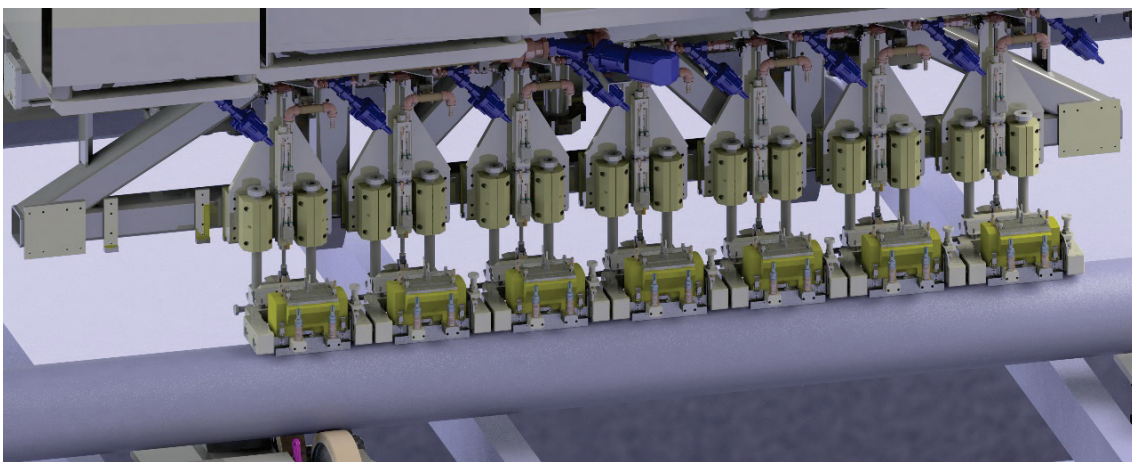


Abb. 4. Prüfschlitten mit acht Clustern zur Detektion von Längs-, Quer-, Schrägfehlern und Dopplungen und zur Messung der Wanddicke

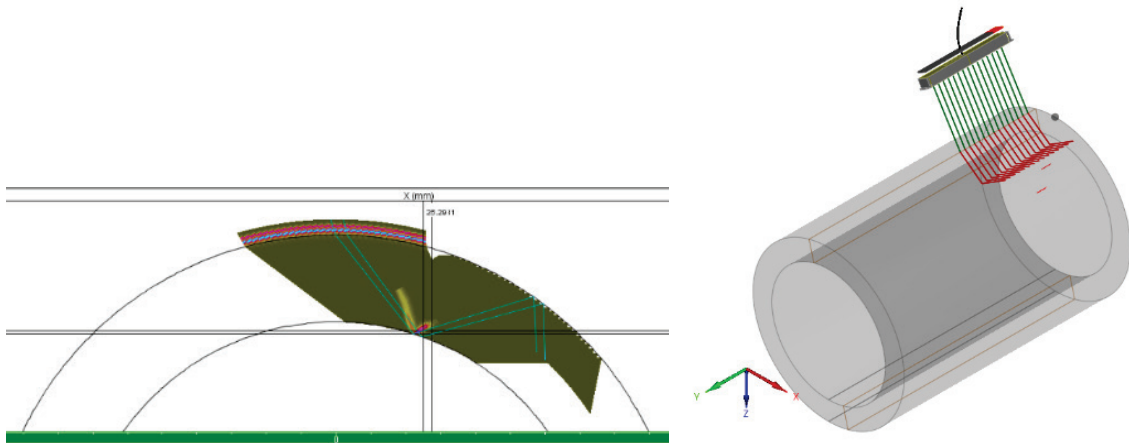


Abb. 5. CIVA-Visualisierung der Längsfehlerprüfung auf der Rohrinneinnenseite

Mit Hilfe vieler Testrohre wurde die Prüfaufgabe validiert. Die Testrohre bestehen aus mehreren Segmenten, um auch eine Anbringung der Testfehler auf der Rohrinneinnenseite zu ermöglichen. Die Schrägfehlerprüfung wurde mit Hilfe von Nuten von $7,5^\circ$ bis 75° in $7,5^\circ$ -Schritten erprobt. Die Testrohre enthielten auch eine 10%-Ausfräsung zur Überprüfung der Wanddickenmessung und Flachbodenbohrungen mit Durchmessern von 3,2 mm in 25 %, 50 % und 75 % Tiefe bezogen auf die Wanddicke.

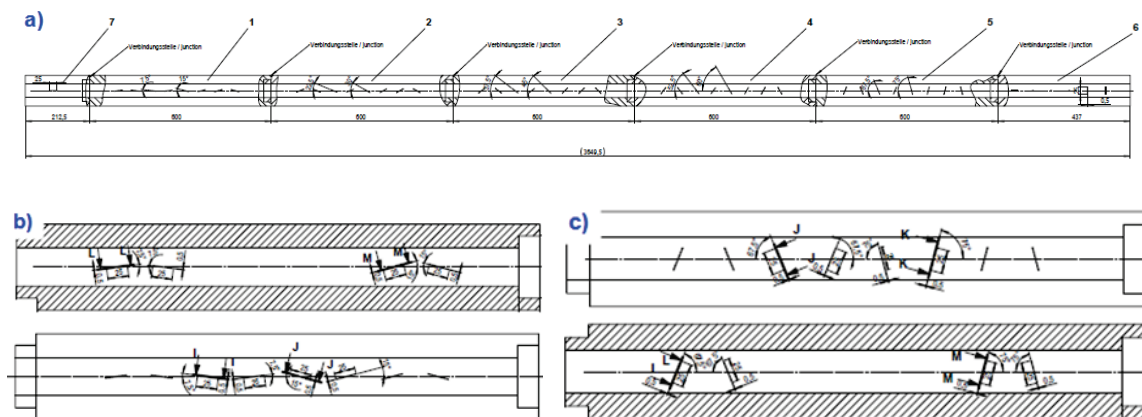


Abb. 6. a) Dickwandiges Testrohr (101,8 mm x 28 mm) bestehend aus sechs Segmenten, b) Rohrsegment Nr. 1 mit schräg liegenden Nuten (innen, außen, $\pm 7,5^\circ$, $\pm 15^\circ$), c) Rohrsegment Nr. 5 mit schräg liegenden Nuten (innen, außen, $\pm 67,5^\circ$, $\pm 75^\circ$)

Bei dickwandigen Rohren müssen ggf. getrennte Cluster zur Innen- und Außenfehlerprüfung zum Einsatz kommen. In besonderen Fällen werden auch modenkonvertierte Wellen zur Fehlerdetektion verwendet.

Eine mechanische Schrägstellung der Prüfköpfe in Kombination mit einem elektronischen Schallbündelschwenk in Rohrachsrichtung erzeugt ein Schallbündel zur Schrägfehlerprüfung. Mehrere Rekonstruktionen im Empfangsmodus erlauben die Abdeckung eines gewissen Bereichs für die Schrägfehler. Eine sorgfältige Auslegung der Prüfanlage sorgt für die optimalen Prüfparameter für das gesamte Produktspektrum von TKM-ARTROM. Besonders die Schrägfehlerwinkellagen um 60° bei dickwandigen Rohren waren bezüglich der Auslegung komplex. Um die Justierung möglichst komfortabel zu halten, ist es auch möglich, dass nicht alle Cluster und Prüfköpfe für jede Rohrabmessung im Einsatz sind.

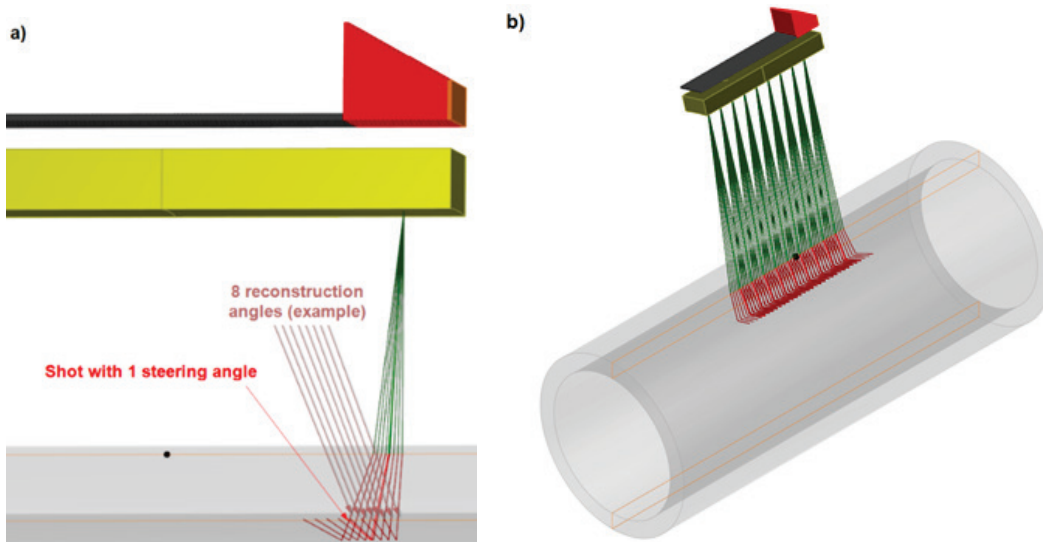


Abb. 7. Schrägfehlerprüfung mit Phased Arrays, **a)** ein Sendeschuss und acht Rekonstruktionen im Empfangsmodus, **b)** mehrere Sendeschüsse und die zugehörigen Empfangsrekonstruktionen

Das folgende Beispiel zeigt die Längs-/Schrägfehlerprüfung in einem Bereich zwischen 0° und 30° , die in diesem Fall nur ein Cluster erfordert. Pro Prüfkopf sind acht Prüffunktionen (Salvos) aktiv. Der Amplitudenschrieb zeigt die Nutanzeigen mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis.

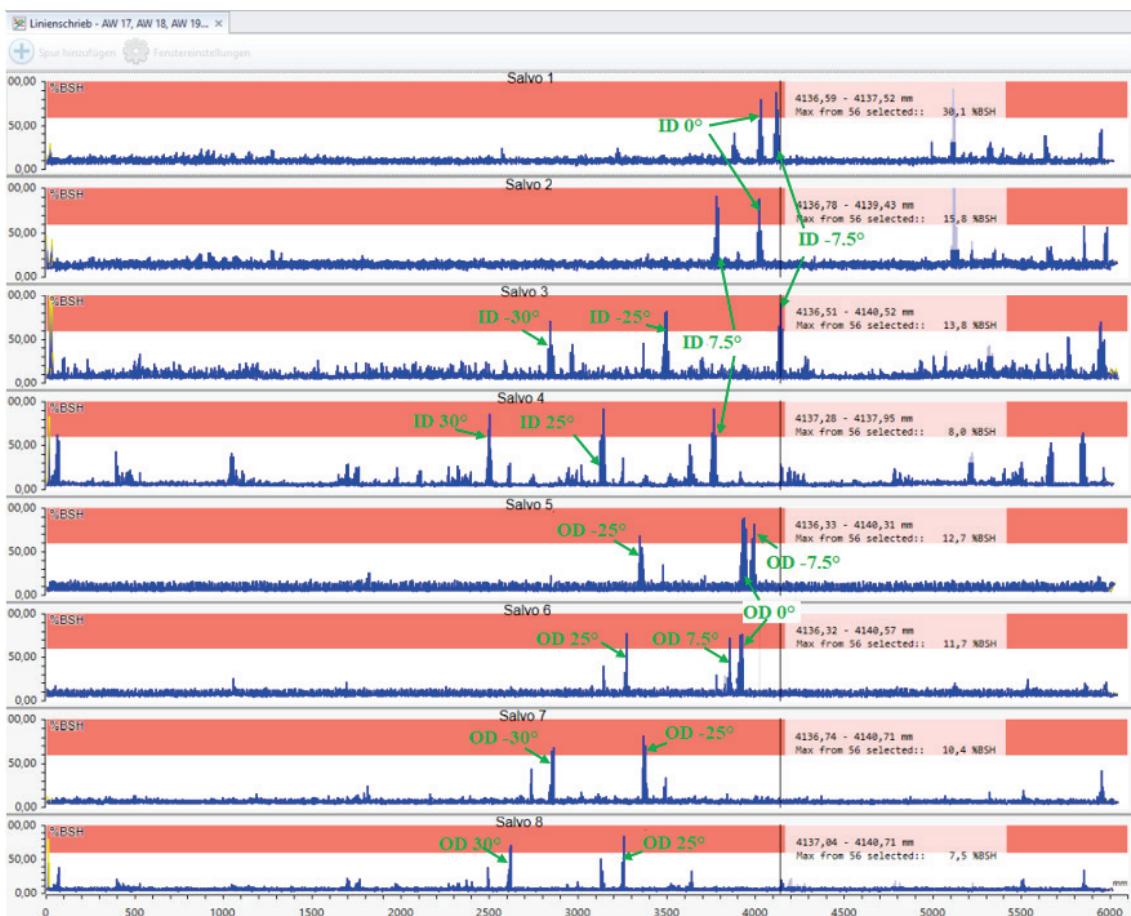


Abb. 8. Schrägfehlerprüfung bis $\pm 30^\circ$ mit Cluster 1 und zwei Prüfköpfen in dickwandigem Testrohr

Bei Helix-Rohrprüfanlagen ist die Querfehlerprüfung ebenfalls eine Herausforderung. Ein feiner Pitch der Prüfköpfe und ausreichend virtuelle und überlappende Prüfköpfe sorgen für eine gleichmäßige Prüfempfindlichkeit (Abb. 9b unten). Des Weiteren wurden mehrere parallele Schüsse im gleichen Prüfkopf gezündet, um Prüfzeit zu sparen.

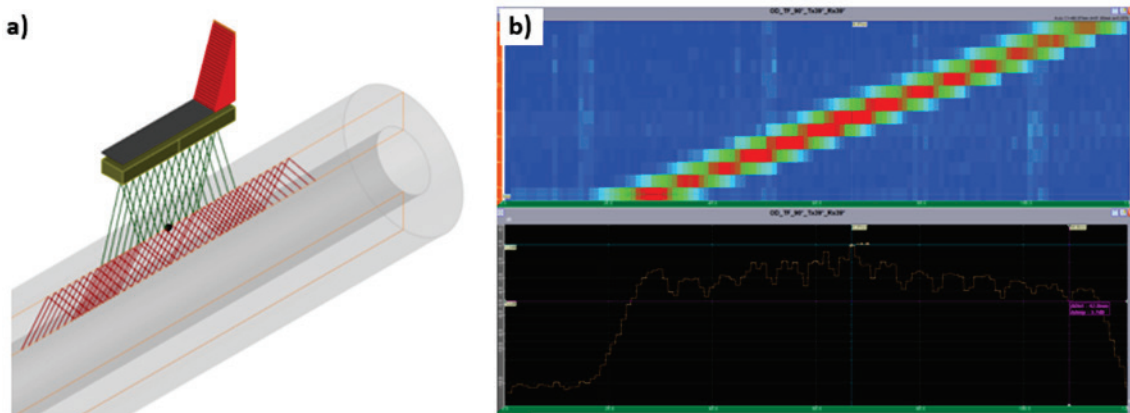


Abb. 9. Querfehlerprüfung mit Phased Arrays, **a)** Schallbündelschwenk in beide Rohrachsrichtungen mit jeweils 14 Schüssen, **b)** Beispiel der überlagerten Schallbündeldurchmesser entlang des Prüfkopfes für eine außen liegende Quernut

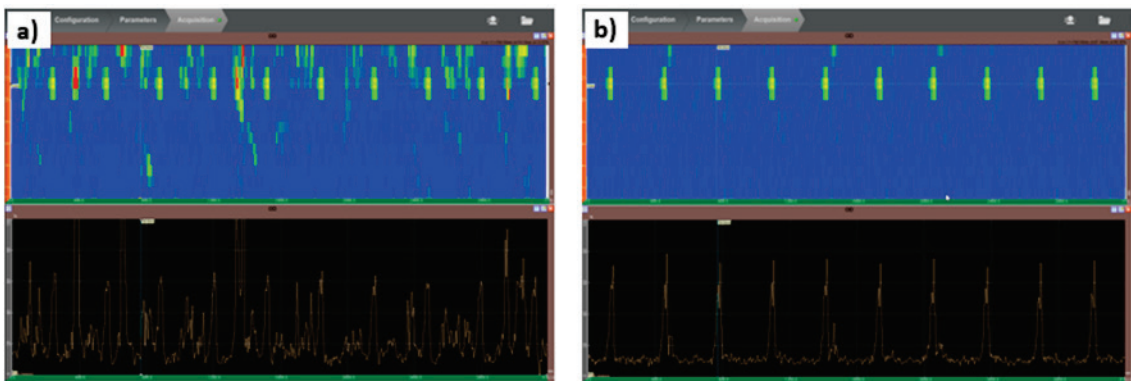


Abb. 10. Signal-Rausch-Verhältnis für 10 Rohrrotationen mit 1,5 m/s Umfangsgeschwindigkeit für außen liegende Quernut, **a)** Sequentielle Schussfolgen, **b)** Schussfolgen mit zwei zeitgleich arbeitenden virtuellen Prüfköpfen

3. ECHOVIEW-Datensoftware

Bei über 1500 parallelen Prüfkanälen und einer Vielzahl von Empfangsrekonstruktionen fallen ungeheure Datenmengen an. Daher ist eine Vorverdichtung der Prüfdaten in separaten PCs erforderlich, bevor die sie kundenspezifisch mit der ECHOVIEW-Datensoftware visualisiert werden. Eine Schnittstelle zum Warenwirtschaftssystem des Kunden wird ebenfalls implementiert.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein noch laufendes Projekt vorgestellt. Im Laufe des Sommers 2021 wird die Prüfanlage vollständig getestet den Anlagenbau von KARL DEUTSCH verlassen. In der zweiten Jahreshälfte erfolgt die Inbetriebnahme bei TMK-ARTROM.



Abb. 11. ECHOGRAPH-RPTR-PAUT-Prüfbrücke (rechts) während der Montage bei KARL DEUTSCH in Wuppertal (links im Bild ein ECHOGRAPH-TTPS-Tauchtankprüfsystem während des Zusammenbaus)

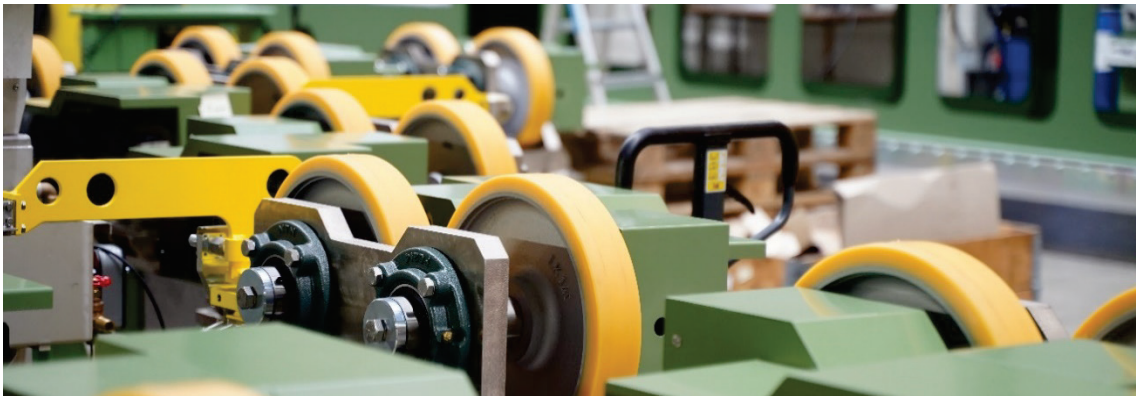


Abb. 12. Impression der Doppelrollenstationen

Referenzen

- [1] D. O. Comuzzi, et al., „Equipamente de Ultra-Som de Corpo para Tubos Casing Tratados e Line Pipe“, 3rd. Pan-American NDT Conference, June 2003
- [2] R. H. Pawelletz et al., „Practical Application of the Phased-Array Technology with Paint-Brush Evaluation for Seamless-Tube Testing“. Proceedings of the ECNDT 2006.
- [3] S. Falter et al., „Practical Application of the Phased-Array Technology with Paint-Brush Evaluation for Seamless-Tube Testing“. Proceedings of the WCNDT 2004.
- [4] C. Breidenbach et al., „New Phased-Array Ultrasonic Testing Gantry with Extended Testing Functions for Testing of Hot Rolled Seamless Steel Tubes and Pipes“. Proceedings ECNDT 2014.
- [5] E. Grondin, „Inspecting Seamless Tubes with Phased Array Using the Gapless Inspection Method“, Proceedings of the ECNDT 2018.
- [6] P. Copèret, „DEVICE AND METHOD FOR ANALIZING THE STRUCTURE OF A MATERIAL“. Patent WO 03029808.
- [7] P. Copèret et al., „Phased Array pour le Contrôle Rapide de Tube en Production“. Proceeding Journees COFREND 2011.
- [8] X. Harrich et al., „FAAST Very Fast Phased Array System“. Proceedings of the WCNDT 2016.
- [9] R. Peters et al., „Automatic Ultrasonic Testing of Seamless Steel Pipes with Matrix Arrays“. Proceedings of the ECNDT 2018.
- [10] W. A. K. Deutsch et al., „Phased Array Ultrasonic Testing of Heavy-Walled Seamless Tubes by Means of a Testing Portal“. Proceedings of the ECNDT 2010.
- [11] M. Vahe et al., „Utilisation de Capteur Ultrason Multiélément 1.5D pour le Contrôle de Défauts Longitudinaux sur Tube à Fort Rapport Épaisseur/Diamètre“. Proceeding Journees COFREND 2017.