

Ultraschall-Prüfung von dickwandigen nahtlosen Rohren mit einem Gruppenstrahler-Prüfportal

Dr. (USA) Wolfram A. Karl DEUTSCH, Michael JOSWIG, Klaus MAXAM
KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal, Deutschland
Stefan NITSCHKE, VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Düsseldorf
Michel VAHE, VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Aulnoye
Alexandre NOËL, VRA (Vallourec Research Aulnoye), France
Patrick PICHARD, Sylvain DEUTSCH
M2M Phased Array Technologies, Les Ulis bei Paris, France

Zusammenfassung. In diesem Beitrag wird ein Ultraschall-Prüfportal für dickwandige nahtlose Rohre im Durchmesserbereich von 178 bis 419 mm, einem Wanddickenbereich von 20 bis 100 mm und Längen von 4 bis 15 m vorgestellt.

Während der Prüfung wird das Rohr helixförmig abgescannt. Während sich das Rohr dreht, werden die Prüfköpfe in Längsrichtung verschoben und in der 12-Uhr-Position auf dem Rohr angekoppelt. Das Besondere an dieser Prüfanlage ist die Art der Ankopplung mit Fließwasser (auch Squirter-Technik oder Wasserstrahlankopplung genannt). Die Länge des Wasserstrahls liegt in der Größenordnung von einigen Zentimetern.

Insgesamt werden fünf Prüfkopfhalter eingesetzt. Vier Prüfkopfhalter beinhalten die Prüfköpfe für den Nachweis von Längs- und Querfehlern und die fünfte Halterung enthält einen Senkrecht-Prüfkopf für die Wanddickenmessung und den Nachweis von Ungängen innerhalb der Rohrwand.

Alle Prüfköpfe sind als Gruppenstrahler ausgeführt. Damit lassen sich die Prüfparameter elektronisch einstellen und somit die optimalen Einschallwinkel für den Nachweis von Längsfehlern innen und außen wählen. Das ist besonders wichtig für dickwandige Rohre.

Zum Nachweis von Querfehlern werden Gruppenstrahler-Prüfköpfe mit überlappenden Schallfeldern eingesetzt. Auf diese Weise wird eine hohe Zuverlässigkeit bezüglich des Fehlernachweises erreicht. Gleichzeitig werden Amplitudenschwankungen bei der dynamischen Prüfung reduziert.

Die Prüfköpfe sind in kardanischen Halterungen montiert und können so flexibel an der Oberfläche geführt werden. Die Führungselemente bestehen aus gehärteten Stahlrollen und müssen für verschiedene Rohrdurchmesser aufgrund der Ankopplung über einen Wasserstrahl nicht ausgewechselt werden. Dadurch ergeben sich kurze Umrüstzeiten und eine lange Lebensdauer der Mechanik.

Für die Prüfung wird eine moderne 192-kanalige Gruppenstrahler-Elektronik der Firma M2M eingesetzt.

Ultraschall-Ankoppel-Techniken

Weil Luft ein schlechter akustischer Leiter im Ultraschallbereich ist, wird bei den meisten industriellen Anwendungen Wasser verwendet. Das hat einen Einfluss auf die Auslegung von Prüfanlagen. Die Grundlagen zum Thema Ankopplung werden im Folgenden beschrieben:

Die Tauchtechnik ist eine gebräuchliche Methode für kleinere Prüfobjekte, die nacheinander geprüft werden, z. B. Komponenten aus dem Automobilbau. Für die Online-Prüfung von Rohren bis zu einem Durchmesser von 170 mm wurde ein spezielles Wasserkammersystem (HRP) patentiert. Dabei wird nur ein kleiner Teil des Rohres eingetaucht.

Größere Rohrdurchmesser mit wachsenden Ovalitäten erfordern eine Prüfkopfführung auf der Oberfläche des Rohres und damit andere Ankoppel-Konzepte. In industriellen Anwendungen werden häufig die beiden folgenden Techniken eingesetzt: Zum einen die Koppelspalt-Technik, wobei der Prüfkopf in einer Halterung so eingebaut ist, dass er mit einem Wasserkoppelspalt von ca. 0,3 mm an der Oberfläche geführt wird. Allerdings führen Erschütterungen während des Prüfvorgangs zu Koppelschwankungen. Die Abnutzung von Gleitschuhen und Prüfköpfen sind ein weiterer Nachteil dieser Technik.

Die Wasserstrahl-Ankopplung (auch Squirter-Technik genannt) wird von der Firma KARL DEUTSCH seit den 70er-Jahren eingesetzt. Sie stellt eine elegante Methode zur Vermeidung der zuvor genannten Einschränkungen dar. Über den Wasserstrahl ergeben sich stabile Koppelbedingungen und eine lange Lebensdauer der Prüfkopfsysteme. Die Wassersäule wird über eine Kunststoffdüse auf die Rohroberfläche gelenkt. Dabei muss der Wasserstrahl einen ausreichend großen Durchmesser haben, um das ganze Schallfeld übertragen zu können. Für ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis sind Luftblasen und Turbulenzen zu vermeiden. Die hier eingestellten Wassersäulen von 50 bis 150 mm Länge leiten den Schall in das Rohr. Diese Technik ist nahezu verschleißfrei. Nur die Führungsrollen müssen gelegentlich ausgetauscht werden – allerdings nicht bei einem Durchmesserwechsel. Möglich sind relative Geschwindigkeiten zwischen Rohr und Prüfkopf von 2 m/s.

Weil Gruppenstrahler-Prüfköpfe meist größer sind als konventionelle Prüfköpfe, und weil zusätzlich das Schallfeld geschwenkt werden kann, muss der Durchmesser des Wasserstrahls wesentlich größer als bei konventionellen Prüfsystemen sein. Außerdem muss die Wassersäule bis 150 mm lang sein, um bei den dickwandigen Rohren Störechos zu vermeiden. Die Entwicklung entsprechender Wasserdüsen und Prüfkopfhalterungen waren eine besondere Herausforderung in diesem Projekt.

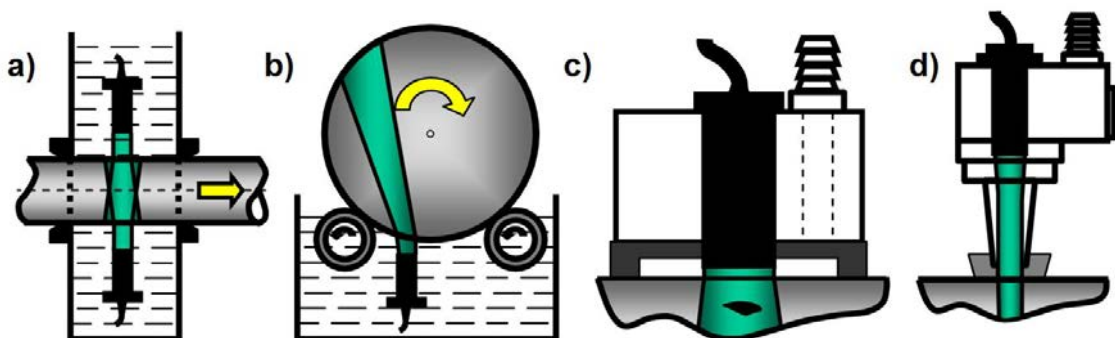


Abbildung Koppeltechniken. a) Tauchtechnik für die Hochgeschwindigkeits-Online-Prüfung, b) partielle Tauchtechnik, c) Wasserspaltankopplung und d) Wasserstrahlankopplung (Squirter-Technik).

Ultraschall-Prüfkonzepete für Rohre

Rohre mit Durchmessern von 10 bis 170 mm werden mit dem ECHOGRAPH-HRP.R-System geprüft. Der größte Vorteil dieses Systems liegt in der hohen Durchlaufgeschwindigkeit von 2 m/s, wobei die Rohre ohne mechanische Rotationen linear die Prüfanlage durchlaufen. Das Rohr ist ringförmig von Prüfköpfen umgeben, deren Schallfelder sich überlappen und somit eine komplette Abdeckung gewährleisten. Fehlerlängen werden im Vergleich zu rotierenden Systemen zuverlässiger bestimmt, und auch der Nachweis kurzer Fehler ist ein besonderes Merkmal von Systemen mit stationären Prüfköpfen.

Rohre mit größeren Durchmessern bis 610 mm können in partieller Tauchtechnik mit der ECHOGRAPH-RPS.R-Anlage geprüft werden. Dabei befinden sich wassergefüllte Kammern mit den Prüfkopfsystemen unter dem Rohr. Die Prüfköpfe bleiben in ihrer Position, während das Rohr schraubenförmig über die Wasserkammern geführt wird. Mit dieser Methode können auch größere Prüfköpfe gut angekoppelt werden – eine gute Voraussetzung für Gruppenstrahler-Prüfköpfe. Ein Nachteil ist allerdings die komplexe und relativ teure Rohrmanipulation, wobei die Drehbewegung und die lineare Verschiebung ohne Schlupf funktionieren müssen. Darüber hinaus müssen die Wasserkammern regelmäßig gereinigt werden, weil sich loser Rost und Schmutz darin sammeln können.

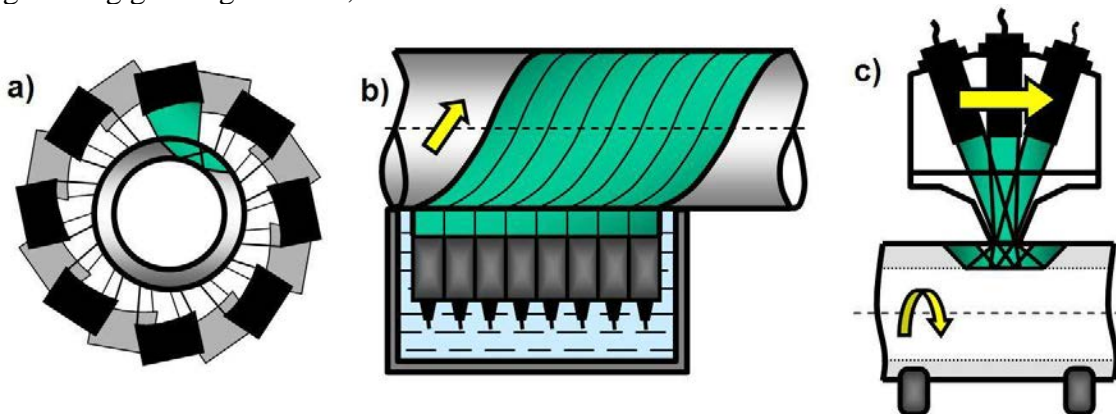


Abbildung Rohr-Prüfsysteme. a) Hochgeschwindigkeits-Online-Prüfung, b) Prüfung mit partiellem Eintauchen und c) Rohrprüfung mit einem Prüfportal und Fließwasserankopplung

Als drittes Prüfsystem wird die Anlage ECHOGRAPH-RPT.R betrachtet. Dieses System eignet sich für die Offline-Prüfung. Mit Hilfe eines Fördersystems werden die Rohre geladen. Wenn das Rohr im Prüfportal liegt, wird es über Rollen in Rotation versetzt. Die Anzahl der Prüfkopfhalter richtet sich nach der geforderten Prüfgeschwindigkeit. Die Prüfkopfsysteme werden in der 12-Uhr-Position linear über das Rohr verschoben. Das Rohr wird schraubenförmig (helixförmig) abgescannt. Die Ankopplung erfolgt über einen Wasserstrahl (Squitter-Technik) mit den bereits aufgezählten Vorteilen. Die besondere Herausforderung ergibt sich hierbei aus den großen Wanddicken mit den dafür erforderlichen langen Wassersäulen mit einer laminaren Strömung.

Nachweis von Längsfehlern

Aufgrund der Fertigungstechnik im Rohrwerk ist der Nachweis von Längsfehlern besonders wichtig. Für dickwandige Rohre muss der optimale Einschallwinkel genau bestimmt werden. Beim Einsatz von Gruppenstrahlern wird der Einschallwinkel elektronisch gewählt – ohne mechanische Änderungen. Auch bei einem Wechsel des

Rohrdurchmessers müssen nur die Prüfparameter per Software neu eingestellt werden. Die mechanische Position der Prüfköpfe und der Führungselemente bleibt erhalten. Für diese Anwendung wurde ein 2-MHz-Gruppenstrahler gewählt. Der Helix-Vorschub pro Umdrehung beträgt ca. 10 mm. Für einen höheren Durchsatz werden vier baugleiche Gruppenstrahler eingesetzt. Die Prüfung auf Längsfehler erfordert eine Einschallung in beide Umfangsrichtungen der Rohrwand (Uhrzeigersinn und Gegenuhreigersinn).

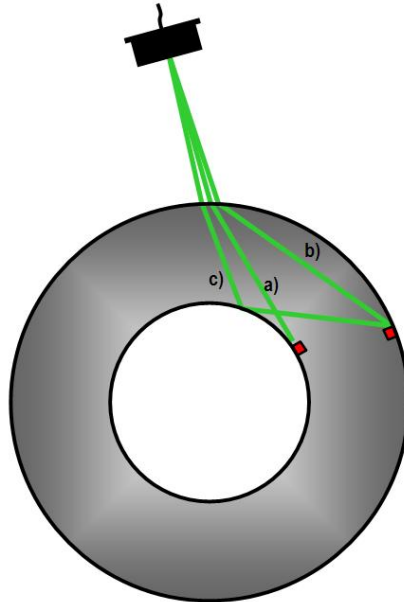


Abbildung zum Nachweis von Längsfehlern. Darstellung von drei möglichen Schallstrahlen (nicht maßstabsgerecht) **a)** direkte Anschallung eines Innenfehlers, **b)** direkte Anschallung eines Außenfehlers, **c)** Anschallung eines Außenfehlers im ganzen Sprung.

Nachweis von Querfehlern

Zum Nachweis von Querfehlern wurde ein linearer 4-MHz-Gruppenstrahler-Prüfkopf gewählt. Durch die Drehbewegung entsteht eine hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Prüfköpfen und Rohr, was die Auffindung von Querfehlern erschwert. Die Querfehlerprüfung erfolgt mit festem Winkel und elektronischer Verschiebung der virtuellen Schwingereinheit (überlappende Schallbündel). Auch hierbei beträgt der Helix-Vorschub pro Halter ca. 10 mm. Für höhere Durchsätze werden vier baugleiche Querfehler-Systeme eingesetzt. Die Einschallung erfolgt in beiden Achsrichtungen des Rohres.

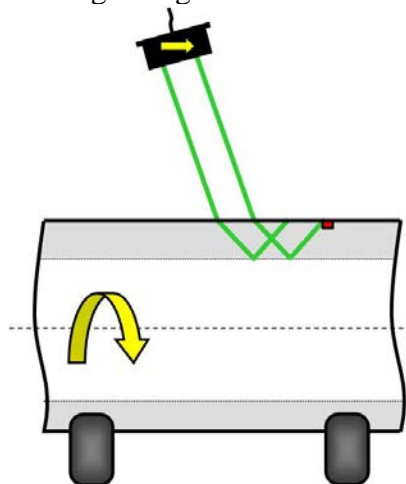


Abbildung zum Nachweis von Querfehlern. Darstellung von zwei Schallstrahlen (nicht maßstabsgerecht), die durch Verschiebung der virtuellen Schwingereinheit innerhalb des Arrays erzeugt werden. Die Schallbündel weisen eine ausreichende Überlappung auf.

Wanddickenmessung und Nachweis von Dopplungen

Für diese Prüfaufgabe wurde ein linearer Gruppenstrahler mit 32 Elementen und 4 MHz gewählt. Die Array-Länge und der daraus resultierende Helix-Vorschub beträgt 50 mm. Die Wasserstrahl-Ankopplung eines solch langen Prüfkopfes war eine konstruktive Herausforderung.

Für die Wanddickenmessung und zum Nachweis kleiner Fehlstellen in der Rohrwand muss jeweils unterschiedlich fokussiert werden. Die große Wanddicke beeinflusst die Fokussierungsparameter in starkem Masse. Aus den Messwerten werden C-Bilder für das ganze Rohr erstellt. Wanddickenänderungen und in der Wand liegende Fehler werden in farbcodierten Abbildungen dargestellt (grün für IO und rot für NIO).

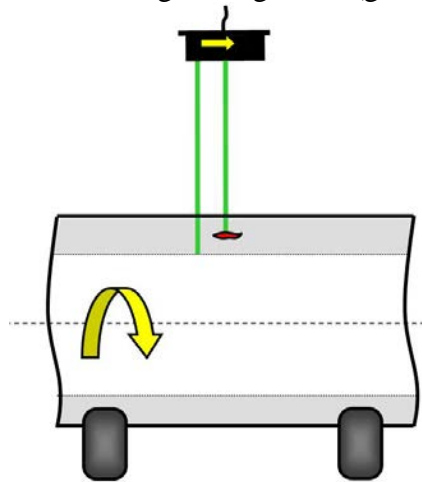


Abbildung zur Wanddickenmessung und zum Nachweis von Dopplungen. Darstellung von zwei Schallstrahlen zur Bestimmung der Wanddicke und zum Nachweis von in der Wand liegenden Ungängen.

Prüfkopfanzordnung

Zur Erfüllung der Kundenanforderungen zur Durchsatzgeschwindigkeit werden fünf Prüfkopfhaltungen eingesetzt. Mit vier Halterungen werden Längs- und Querfehler mit der Winkeleinschallung detektiert. Die fünfte Halterung dient zur Senkrechteinschallung.

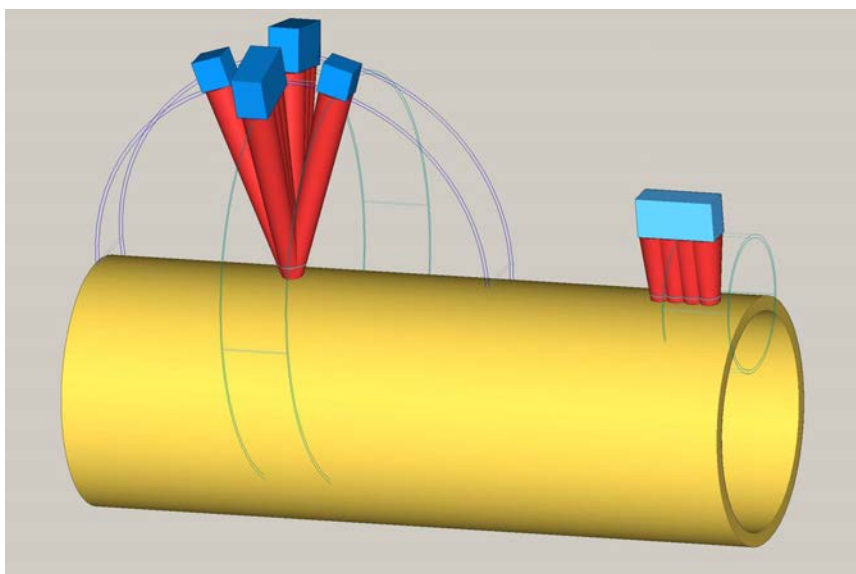


Abbildung Einschallrichtungen. Winkeleinschallung für den Nachweis von Längs- und Querfehlern (links) und Senkrechteinschallung zur Wanddickenmessung und zum Nachweis von Dopplungen (rechts).

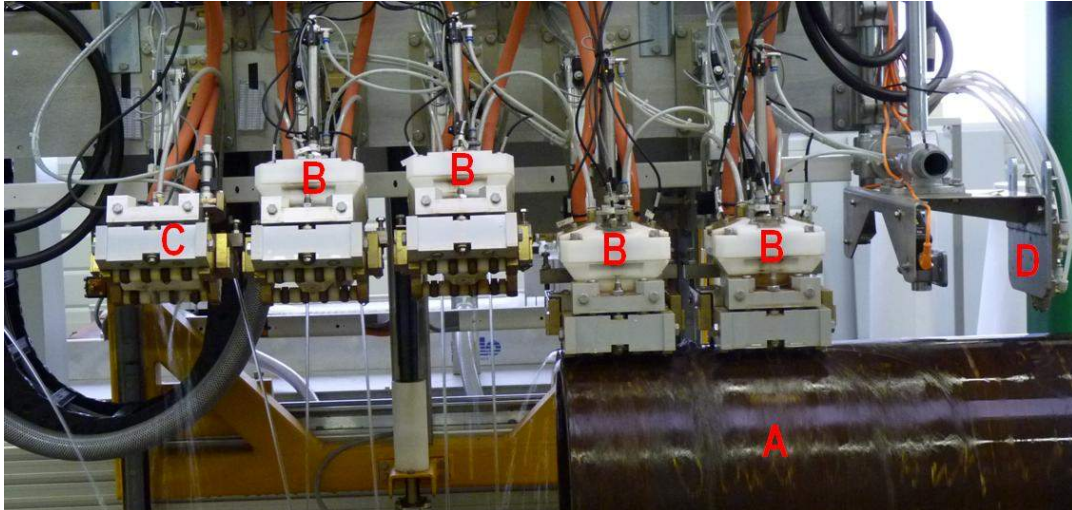


Abbildung Prüfkopfhalter. A = Kalibrierrohr, B = Vier Prüfkopfhalter für Quer- und Längsfehler, C = Prüfkopfhalter für die Senkrechprüfung und D = Farbmarkierungssystem

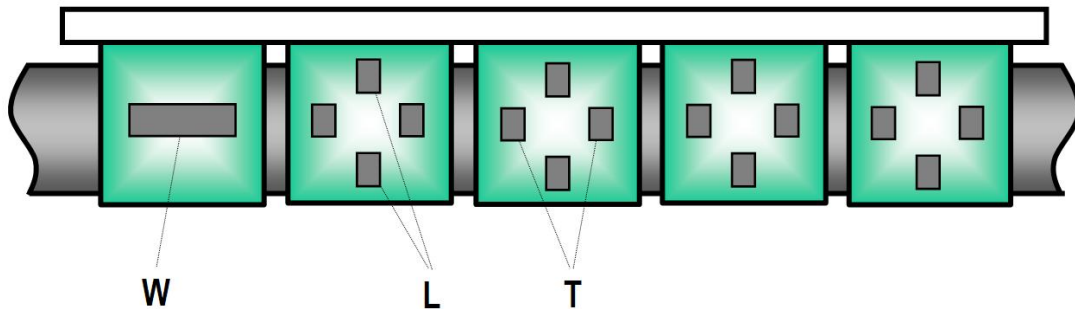


Abbildung Prüfkopfkonfiguration. L = Längsfehler, T = Querfehler und W = Wanddickenmessung (und Nachweis von Dopplungen).

Prüfanlage ECHOGRAPH-RPT.R

Diese Prüfanlage wurde komplett im KARL DEUTSCH - Anlagenbau Wuppertal entwickelt und montiert. Die Anlage wurde vor der Auslieferung geprüft und getestet, um die Installation bei Vallourec-Mannesmann zu verkürzen. Die Anlage ist ca. 25 m lang. Ein kurzes Rohrsegment und ein längeres Testrohr sind in dem Foto abgebildet. In beide Prüfteile wurden künstliche Fehler eingebracht. Das kurze Rohrstück wird für die dynamische Systemkalibrierung verwendet. Ein 700 mm langer Rohrabschnitt reicht aus, um die Prüfempfindlichkeit mit vollständigem Helix-Vorschub einzustellen. Danach werden mit Hilfe des langen Testrohres die Systemparameter überprüft.

Der Rohrtransport, der Kalibrierstand und die Rohrmuster wurden von Vallourec-Mannesmann in Aulnoye beigestellt und waren nicht Teil des Lieferumfanges.



Abbildung Prüfanlage. Foto der Prüfanlage vor der Auslieferung. A = Prüfelektronik, B = Prüfkopfhalter, C = Prüfportal, D = provisorische Kalibrierstation und E = Produktionsrohr mit Testfehlern.

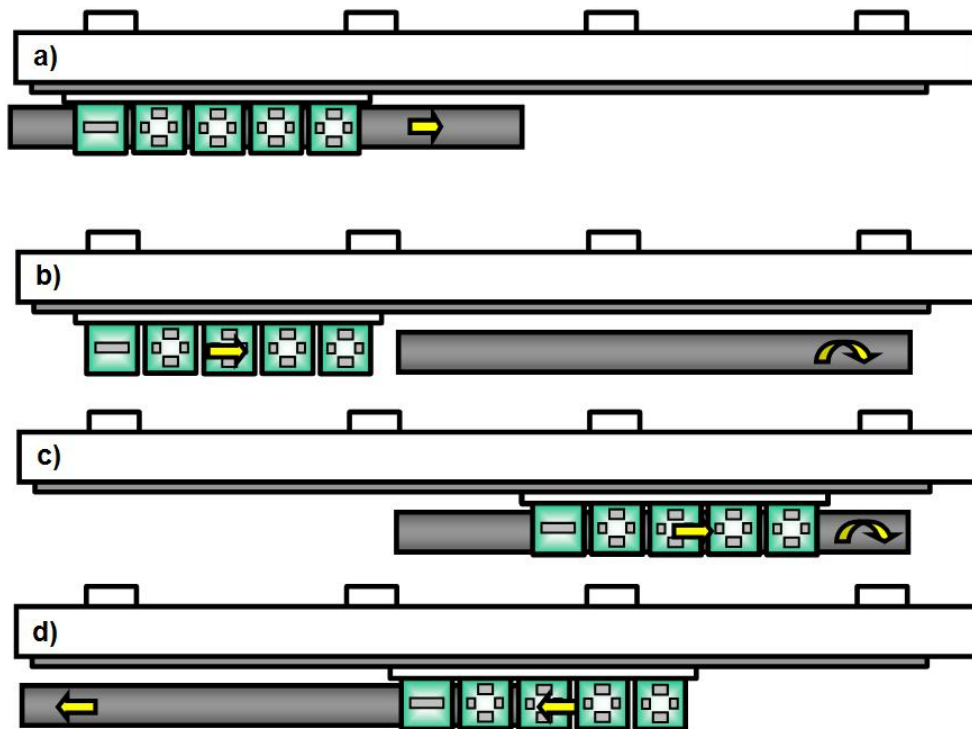


Abbildung Prüfzyklus. a) Laden des Rohres, b) Rohr wird gedreht und die Prüfköpfe fahren in die Prüfposition, c) rotierende Rohrprüfung und d) Entladen des Rohres und Zurückfahren der Prüfkopfhalter in die Ruheposition.

Gruppenstrahler-Prüfelektronik

In der MultiX-Hardware werden die Ultraschall-Sende- und Empfangssignale analog verarbeitet und die Datenerfassung erfolgt digital entsprechend der eingestellten Zeitverzögerungen (Focal Laws). Die MultiX-Hardware basiert auf einer Parallel-Architektur. Für alle Elemente steht ein eigener Sende- und Empfangskanal zur Verfügung. Die Hauptkomponenten sind 8-Kanal-Boards, die mit dem Motherboard verbunden sind. Vom Motherboard werden die Daten aller 8-Kanal-Boards zum PC oder anderen externen Geräten gesandt. Diese Architektur erlaubt jede beliebige Kombination der Kanäle und eine Real-Time-Änderung der „Focal Laws“ während der Prüfung. Damit können auch zweidimensionale Arrays (Matrix-Prüfköpfe) angesteuert werden, auch wenn die Fokus-Parameter im Sende- und Empfangsmodus unterschiedlich sind. Der Einsatz von zwei Power-PC-Prozessoren gestattet eine große Anzahl von flexibel programmierbaren Arbeitsschritten, so dass spezielle Anforderungen mit hoher Durchsatzrate erfüllt werden können.

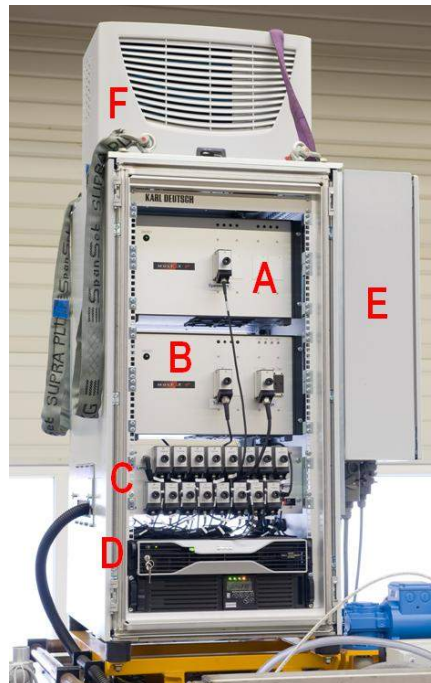


Abbildung Prüfelektronik. Gruppenstrahler-Elektronik für 192 Kanäle. A = Elektronik für Wanddickenmessung, B = Elektronik für Schrägeinschallung, C = Prüfkopfanschlüsse, D = Industrie-PC und E = elektrische Anschlüsse.

Die Multi2000-Software ist sehr flexibel und enthält viele Konfigurationen für die Gruppenstrahler-Ultraschallprüfung. Die „Focal Law“-Berechnungen basieren auf der CIVA-Simulations-Software. Die Software steuert alle Ultraschall- und Datenerfassungsparameter. Sie läuft auf Standard-Computern oder Laptops im Einklang mit den Anforderungen des Anwenders. Per Fernbedienung kann die Multi2000-Software und -Hardware via Ethernet über das TCP/IP-Protokoll gesteuert werden.

Eine spezielle Stärke der CIVA-Software ist das intuitive Setup der Prüfkopf- und Prüfobjekt-Parameter und der relativen Prüfkopfposition auf dem Prüfobjekt. Die Schallfelder als Ergebnisse der „Focal Law“-Berechnungen können bildlich dargestellt werden und ermöglichen so eine Plausibilitätsprüfung. Durch die Simulation lassen sich die Ultraschallparameter (Anzahl der Elemente, Pitch, Schallfrequenz, Bandbreite, Fokussierungsgrad u.s.w.) optimieren, bevor die entsprechenden Prüfköpfe hergestellt werden.

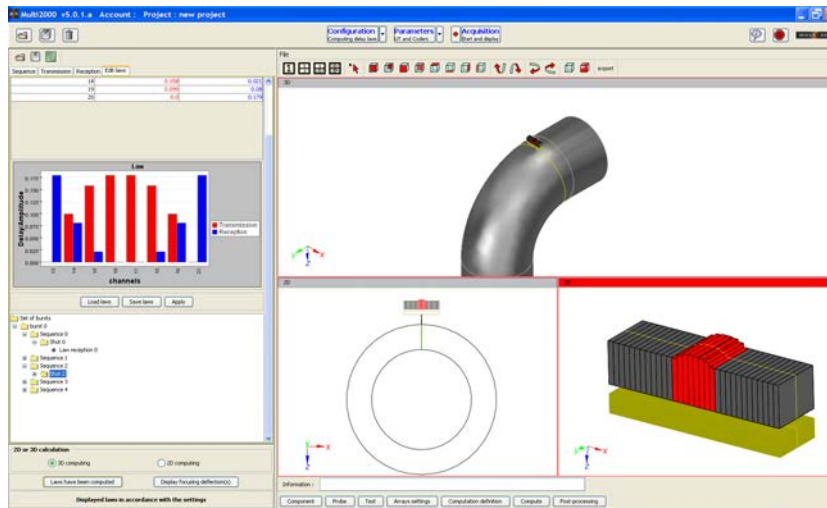


Abbildung CIVA-Software. Phased-Array-Prüfkopf- und Prüfobjekt-Setup mit dem CIVA-Software-Modul

Ultraschall-Prüfergebnisse

Wie schon erwähnt, wird mit dem kurzen Rohrabchnitt mit den künstlichen Fehlern das System dynamisch kalibriert. Das erfolgt in zwei Schritten: Zunächst müssen die künstlichen Fehler (Innen- und Außenfehler) von jedem Prüfkopf bei einem Helix-Vorschub von 10 mm pro Umdrehung erfasst werden. Die Empfindlichkeiten werden egalisiert, so dass alle Innen- und Außenfehler mit allen Gruppenstrahler-Prüfköpfen mit der gleichen Empfindlichkeit detektiert werden. Danach wird die Empfindlichkeitseinstellung überprüft, wobei der Scan mit der vollen Vorschub-Geschwindigkeit von 40 mm pro Umdrehung durchgeführt wird. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Prozedur kann die Prüfanlage zur automatischen Prüfung der Rohre aus der Produktion eingesetzt werden.

Die Ultraschalldaten von einem Kalibrierrohr mit einem Durchmesser von 406 mm und einer Wanddicke von 28 mm sind im Folgenden dargestellt. Vier Nuten (längs, quer, innen und außen) müssen mit jeweils zwei Einschallrichtungen nachgewiesen werden (= acht Prüffunktionen). Die Ultraschall-Amplituden der acht Prüffunktionen aus vier Prüfkopfhalterungen zeigen in der 8x4-Matrix eine erfolgreiche Kalibrierung. Die gelben Cursorlinien markieren die Blenden für die Ultraschalldaten zur automatischen Empfindlichkeitskalibrierung. So kann vermieden werden, dass die großen Signale aus der Wanddickenmessung einen Einfluss auf die Kalibrierung der Echos der Schrägeinschallung haben.

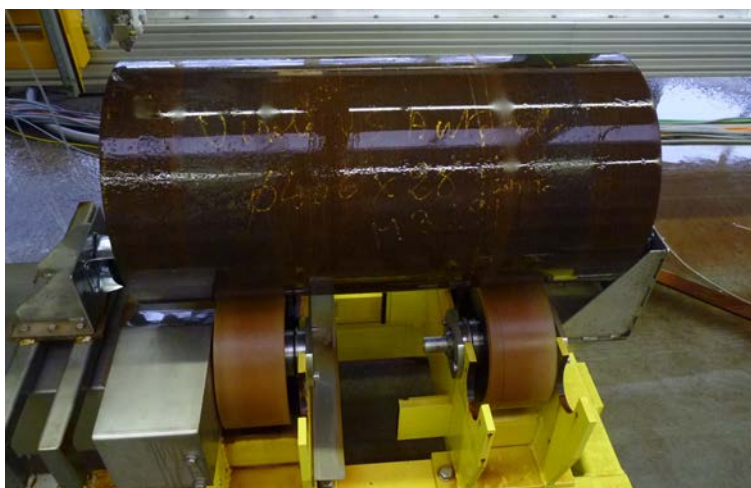


Abbildung Test-Rohr. Kalibrierstation mit Rollenbock und dem Kalibrierrohr (406 mm x 28 mm).

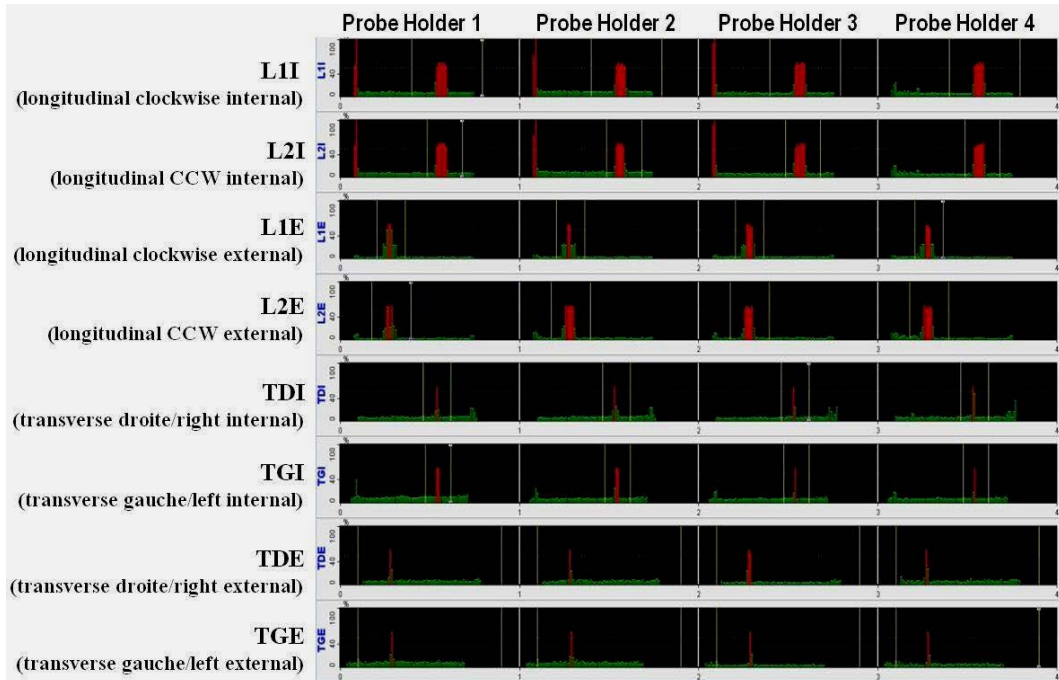


Abbildung Kalibrierung. 8x4-Matrix, in der die Ultraschall-Amplituden von vier Nuten aus zwei Einschallrichtungen dargestellt sind (acht Zeilen für die acht Prüffunktionen). Die vier Spalten repräsentieren die vier Prüfkopfhalterungen.

Nach der Kalibrierung werden die Ultraschall-Parameter mit voller Prüfgeschwindigkeit überprüft. Die Echos von den vier Prüfkopfhalterungen werden im folgenden Strip-Chart umgerechnet so dargestellt, dass sie der Position auf der Rohrlängsachse entsprechen. Jeder Amplitudenblock repräsentiert 40 mm von der Rohrlänge und zeigt jeweils die maximale Amplitude innerhalb dieser Länge. Deutlich sind alle vier Nuten aus beiden Einschallrichtungen zu erkennen.

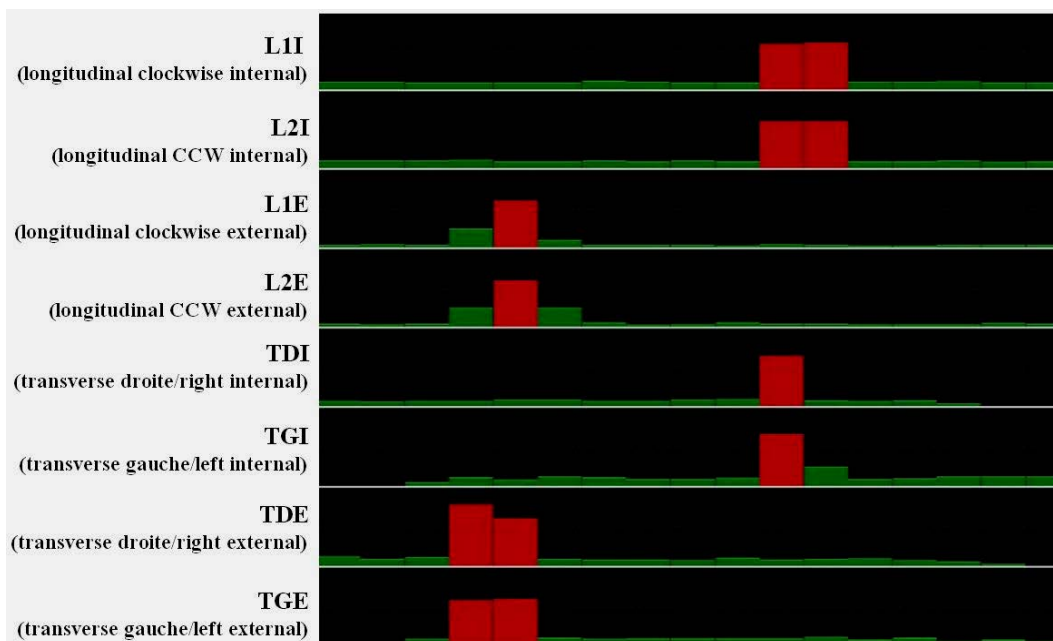


Abbildung Kalibriercheck. Amplituden-Strip Chart für die acht Prüffunktionen mit voller Prüfgeschwindigkeit. Alle vier Nuten werden deutlich aus beiden Einschallrichtungen nachgewiesen. Die Signale stellen die Maximalamplituden der vier Prüfkopfhalterungen dar.

Als Hilfe für den Prüfer werden die aktuellen A-Bilder aller acht Prüffunktionen und die A-Bilder für die Senkrechteinschallung dargestellt. Zusätzlich kann online das Strip Chart oder das C-Bild über Rohrlänge und Rohrumfang eingeblendet werden.

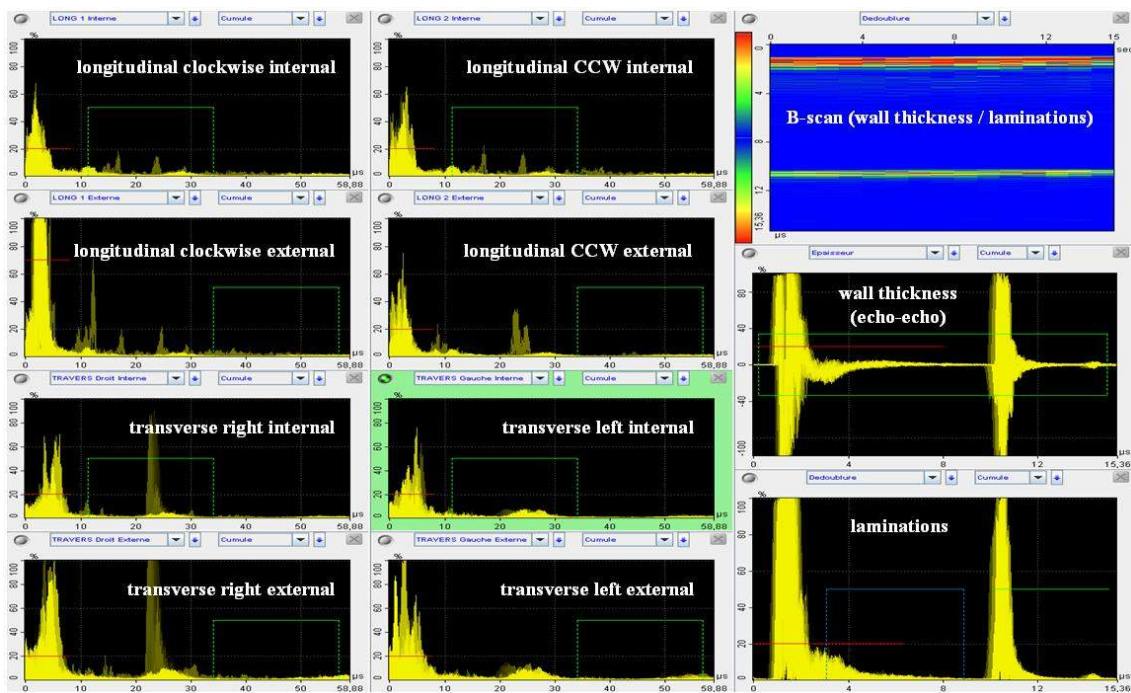


Abbildung Ultraschallsignal-Visualisierung. Links: Die A-Bilder für die acht Prüffunktionen der Schrägeinschallung; rechts: Die Ergebnisse aus der Senkrechteinschallung für die Wanddickenmessung und dem Nachweis von Dopplungen.

Literatur

- [1] V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt: Ultraschallprüfung – Grundlagen und industrielle Anwendungen, 372 Seiten, Springer Verlag, 1997.
- [2] V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt, W. A. K. Deutsch, V. Schuster: Ultraschallprüfung – Kompakt und verständlich, 2. Auflage, 89 Seiten, Castell Verlag, Wuppertal, 2010.
- [3] P. Möller: Ultraschall-Anwendungen mit Prüfkopfhaltern und der Wasserstrahlankopplung, DGZfP-Tagung, Garmisch, Berichtsband S. 109-117, 1993.
- [4] W. A. K. Deutsch: Automated Ultrasonic Inspection – Examples from the Steel Mill, WCNDT World Conference for Nondestructive Testing, Rome Italy, October 2000.
- [5] W. A. K. Deutsch, P. Schulte, M. Joswig, R. Kattwinkel: Automatic Ultrasonic Pipe Inspection, ECNDT European Conference for Nondestructive Testing, Berlin, September 2006.
- [6] L. Le Ber, O. Roy, N. Jazayeri: Applications of Phased Array Techniques to NDT of Industrial Structures, TINDT2008, 2008
- [7] L. Le Ber, O. Roy, P. Benoit: Ultrasonic Phased Array inspection modelling with CIVA, Modelling NDT, 2007.
- [8] P. Benoit, P. Calmon, S. Leberre, T. Sollier: CIVA, an integration software platform for the simulation and processing of NDT data, WCNDT 2004.