

# Mechanisierte Wirbelstromprüfung von austenitischen und Mischschweißnähten an Rohrleitungen gemäß der Anforderungen der KTA 3201.4

Bernd HEUTLING \*, Maksym AWERBUCH \*\*, André KÖHLER \*\*,  
Peter WELLMANN \*\*, Michael STRASSER \*\*\*

\* LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Niederlassung Bremen  
Europaallee 1-3, D-28309 Bremen, info.hb@lvq-wp.com, Tel.: +49 (0)421-417483-0

\*\* Delta Test GmbH  
Brigitta 15, D-29313 Hambühren, contact@deltatest.de, Tel.: +49 (0)5084-9301-0

\*\*\* IBASS GmbH & Co. KG  
Thelottstraße 35, D-86150 Augsburg, info@ibass.com, Tel.: +49 (0)172-2743516

**Kurzfassung.** Im Rahmen des Austauschs von Rückschlagklappen von TK-Systemen waren die neuen Anschlussnähte der Rückschlagklappen (austenitische Schweißnähte) und die neuen Rohranschlussnähte an den RDB-Stützen (Mischschweißnähte) als Teil der Fertigungsendprüfung mechanisiert mit Wirbelstrom von innen zu prüfen. Da die Ergebnisse der Prüfung als Basis für zukünftige wiederkehrende Prüfungen dienen sollten, waren erhöhte Anforderungen an die Dokumentationsfähigkeit des Prüfsystems zu berücksichtigen.

Aufgrund der vielfältigen Schweißnahtausführungen, die bei dieser Prüfung auftreten konnten, musste ein sowohl messtechnisch als auch mechanisch besonders zuverlässiges und robustes Prüfsystem entwickelt und nach der ENIQ-Richtlinie VGB-R516 qualifiziert werden.

Es wurden Wirbelstromprüftechniken qualifiziert, die geeignet sind, Mischschweißnähte und austenitische Schweißnähte der o.g. Typen auf Längs- und Querfehler in der inneren Oberfläche zu prüfen. Die nach KTA 3201.4 [1] nachzuweisenden Fehler konnten sowohl in der Wärmeeinflusszone als auch in der Schweißnaht sicher detektiert werden und wiesen keine Empfindlichkeitsunterschiede hinsichtlich Phase und Signalamplitude auf. Die Eignung der Prüftechniken gemäß KTA 3201.4 wurde erfolgreich nachgewiesen.



Ein Teil der zu prüfenden Schweißnähte bestand aus Mischverbindungen,  $\varnothing_a=298 \times 23$  mm mit einem Flankenwinkel von  $6^\circ$ , die mechanisiert als Engspaltnähte ausgeführt wurden. In der Alternative 1 zu dieser Anordnung wurden die vorhandene Pufferung sowie ein Großteil der Altnaht belassen. Die ferritische Seite der Mischverbindung ist plattiert. In der Alternative 2 werden die Altnaht und die vorhandene Pufferung vollständig entfernt und die ferritische Seite mit einer neuen Pufferung versehen.

Die austenitischen Schweißnähte bestanden zum einen Teil aus Schweißnähten mit  $\varnothing_a= 219 \times 12,5$  mm mit einem Flankenwinkel von ebenfalls  $6^\circ$ , sie wurden mechanisiert geschweißt. Eine weitere der austenitischen Schweißnähte wies sowohl andere Abmaße ( $\varnothing_a= 217 \times 9,0$  mm) als auch andere Flankenwinkel ( $30^\circ$ ) auf und wurde manuell ausgeführt (Abb. 1).

## 2.2 Erwartete Fehlerarten

Die gestellte Prüfaufgabe unterstellte die folgenden möglichen Fehlerarten an der Innenoberfläche, die nachzuweisen waren:

- Längsfehler:
  - austenitische Nähte: Fehler in den Übergängen Schweißgut – Grundwerkstoff
  - Mischnähte (Orientierung jeweils parallel zur Schweißnaht):
    - Fehler im Übergang Schweißgut – austenitischer Grundwerkstoff
    - Fehler im Übergang Schweißgut – Pufferung (bzw. Altnaht)
    - Fehler im Übergang Pufferung – ferritischer Grundwerkstoff
- Querfehler:
  - unabhängig vom Material: Fehler im Schweißgut senkrecht zur Schweißnaht

## 2.3 Justierfehler gemäß Prüfvorschrift

Das Prüfsystem musste auftragsgemäß den Auflagen bzw. Prüfungsbedingungen der KTA 3201.4 in der Fassung 2010-11 genügen [1], wobei gemäß KTA-Forderung bei schwierig zu prüfenden Werkstoffen und bei geometrisch komplizierten Konturen die Eignung der Prüftechnik an Vergleichskörpern nachzuweisen ist. Diese Vergleichskörper wurden den notwendigen Schweißverfahrensprüfungen entnommen und entsprachen den Prüfobjekten in der Anlage in den wesentlichen Eigenschaften wie Geometrie, Schweißnahtform, Werkstoffe einschließlich Schweißzusatzwerkstoffe und Schweißdurchführung.

Die KTA 3201.4 schreibt dazu u.a. vor, dass für den Nachweis rissartiger Fehler Nuten mit Orientierung in Verfahrrichtung der Prüfsonde und quer dazu zu verwenden sind. Als Vergleichsfehler für Wanddicken von 8 bis 20 mm wird eine Nuttiefe von 1,5 mm und für Wanddicken größer 20 mm bis 40 mm wird eine Nuttiefe von 2 mm genannt sowie bei austenitischen Werkstoffen eine Nuttiefe von 1 mm gefordert. Zusätzlich wird eine maximale Nutbreite von 0,3 mm verlangt. Darüber hinaus sind die Anzahl und Tiefe der Bezugsmerkmale so festzulegen, dass der durch die Prüfaufgabe geforderte Tiefenbereich vollständig abgedeckt wird, so dass letztlich je nach Vergleichs-/Prüfobjekt in Abhängigkeit von deren Material und Dimensionen Nuttiefen im Intervall von 0,8 mm bis 4,0 mm realisiert wurden.

Daraus resultierend wurden in die Vergleichskörper alle Nuten normkonform funkenerosiv eingebracht. Die Nuten für die Wirbelstromprüfaufgabe befanden sich auf der Rohrrinnenoberfläche und wiesen verschiedene Fehlertiefen auf. Alle Nuten waren 0,2 mm breit und bedingt durch die Schweißnahtausführung (mit oder ohne Pufferung) 17 bis 20 mm lang. Die Nuten waren längs und quer orientiert bezogen auf die Schweißnahtachse.

Beispielhaft sind die Nutanordnungen in Abbildung 2 für eine austenitische Rohrnaht  $\varnothing_a$  217 x 23 mm dargestellt.

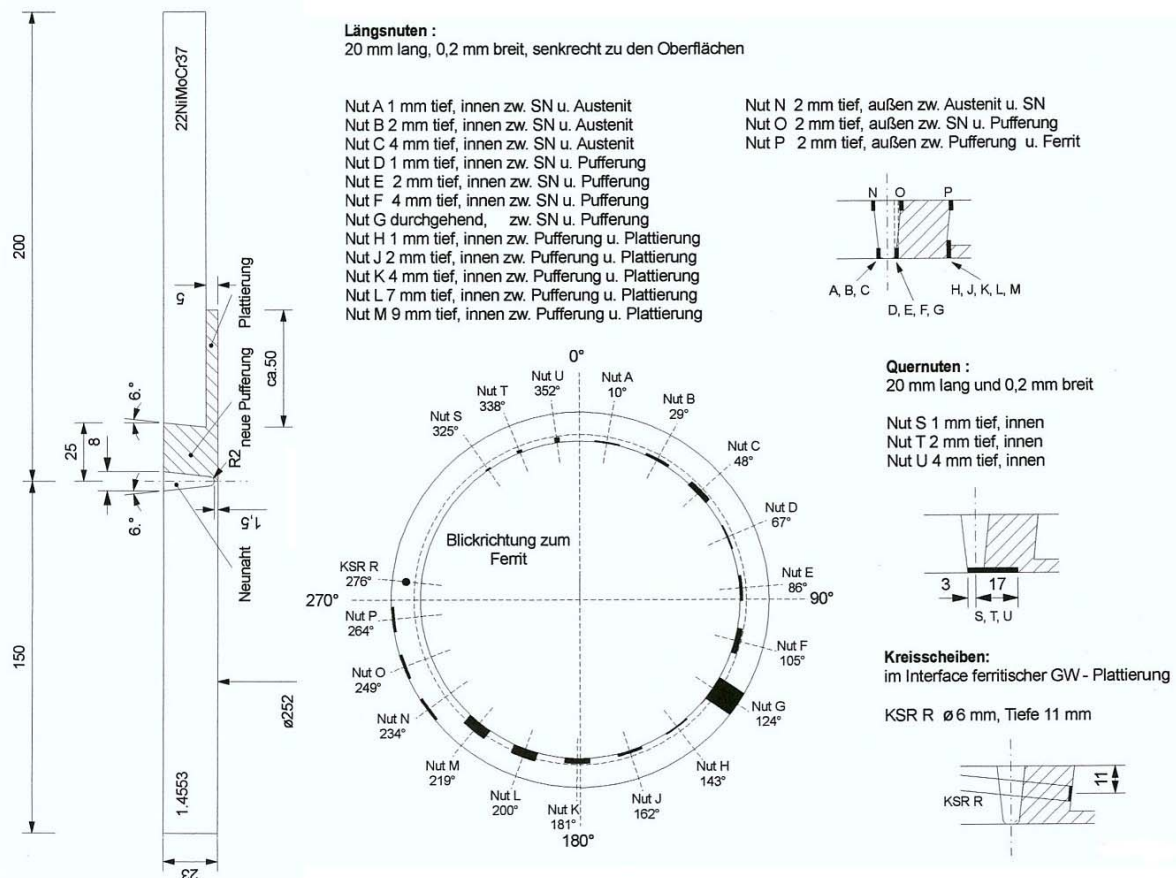


Abb. 2: Nutanordnung für eine Mischnaht  $\varnothing_a$  217 x 23 mm

### 3. Prüftechnik

#### 3.1 Wirbelstromprüftechnik

Aufbauend auf langjährigen Erfahrungen im Bereich der mechanisierten zerstörungsfreien Prüfung von Rohrleitungen im Kraftwerksbereich ([2], [3]) wurde die im Folgenden vorgestellte Prüftechnik entwickelt, qualifiziert und zum Prüfeinsatz gebracht.

Die verwendete Sensoranordnung war ein Erreger-Empfänger-System mit einer gemeinsamen Spulenachse, das im Absolutverfahren geschaltet, Kompensationsspulen aufwies und als Tastsensor ausgeführt war. Der Sensor entsprach damit einer KTA 3201.4-Anforderung nach einer Direktfeldprüftechnik (4.2.4.1 – 3 ab). Dementsprechend lautete die Kurzbezeichnung des Sensors gemäß DIN 54140 Teil 3 AK-T-TS.

Zwei Sensorsysteme gleicher Bauart, jedoch mit unterschiedlichen Durchmessern wurden in einem gemeinsamen Sensorgehäuse kombiniert. Der größere der beiden Sensoren (Sensorwirkbreite 8 mm) diente zur schnellen Detektion von Ungängen, der um 50% kleinere Sensor mit seinem geringen Wechselwirkungsvolumen [4] diente zur hoch auflösenden Analyse und dem empfindlichen Nachweis des geometrischen Verlaufs linienartiger feinsten, aber unregelmäßiger Materialtrennungen.

Aufgrund der Abstandsempfindlichkeit von Absolutsensoren wurde der Abstand des Sensors zur Prüfoberfläche durch den Durchmesser zweier Laufrollen, die am Sensorgehäuse montiert waren, definiert und mittels eines proaktiven Andrucksystems konstant gehalten

(Abb. 3). Darüber hinaus sorgte ein weiterer Rohrrinnenmanipulator (s. 3.2) für kerbfrei beschliffene Prüfflächen.



Abb. 3: Sensor mit proaktiver Abstandskontrolle

Da laut Prüfaufgabe feine Oberflächenfehler zu finden waren, erfolgten die Prüfungen mit Prüffrequenzen im dreistelligen kHz-Bereich für den Standardsensor und ca. 30% höherer Prüffrequenz bei Einsatz des Analysesensors jeweils aktivierter Gleichstromvormagnetisierung. Diese Vormagnetisierung wurde auch beim Prüfproblem „austenitische Schweißnaht“ aufgrund der in der Schweißnaht enthaltenen  $\delta$ -Ferrite eingesetzt und sorgte für ruhige und stabile Messsignale.

Die in der KTA 3201.4 geforderte Signaltrennung von Stör- und Nutzsignalen wiesen beide Sensoren gleichermaßen durch Phasendifferenzen von  $80^\circ$  bzw.  $85^\circ$  auf (Abb. 4).

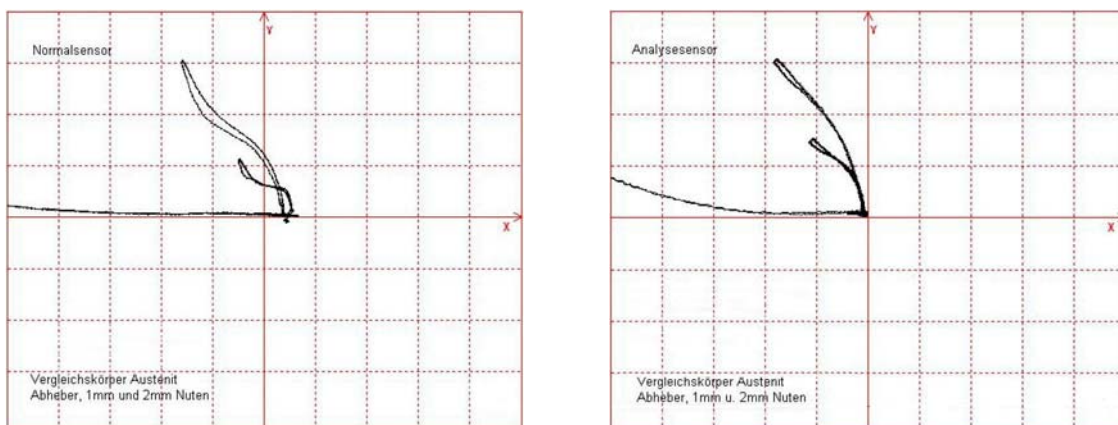


Abb. 4: Justiersignale des Detektions- und des Analysesensors

Als Wirbelstromprüfgerät wurde ein universelles Mehrkanalprüfgerät mit X-Y- und Y-t-Darstellung eingesetzt, das mit einer eigenen Auswertungs- und Dokumentationssoftware (EC-View) betrieben wurde.

### 3.2 Mechanisierung

Da die Prüfaufgabe aufgrund der schlechten Erreichbarkeit der Prüfstellen (Rohrinnenseite) eine Mechanisierung bedingte, wurden die Prüfsensoren in einen kabelgebundenen IBASS-Rohrrinnenmanipulator integriert. Dieser Manipulator wies u.a. einen Antrieb mittels sechs synchron angetriebenen Räder auf, der eine Manövrierbarkeit auch auf vertikalen Rohrabschnitten sowie eine Positioniergenauigkeit von min. zwei Millimetern aufwies. Die Positionierung in Fahrtrichtung (Y-Richtung) wurde mittels eines integrierten Schleppradsystems aufgenommen und via PID-Regler gesteuert.

Die Prüfsensorik wurde über ein an den Roboter angepasstes Rotationsmodul inkl. Schwenkarm in einem kontrollierten Abstand über die Prüfoberfläche geführt (die Manipu-

latoren können auch Schleif- oder PT-Module tragen). Die Signalübertragung auf den statischen Roboterteil erfolgt über ein Schleifringmodul, das integraler Bestandteil des Rotationsmoduls ist.

Die Steuerung wurde aus Platzgründen aus dem eigentlichen Rohrrinnenmanipulator in eine externe Schleppbox ausgelagert und dient sowohl zur Steuerung der Energieversorgung des Roboters als auch zur Aufbereitung und Auftrennung der Datenströme aus Prüf-, Video- und Weginformationsdaten (Abb. 5).

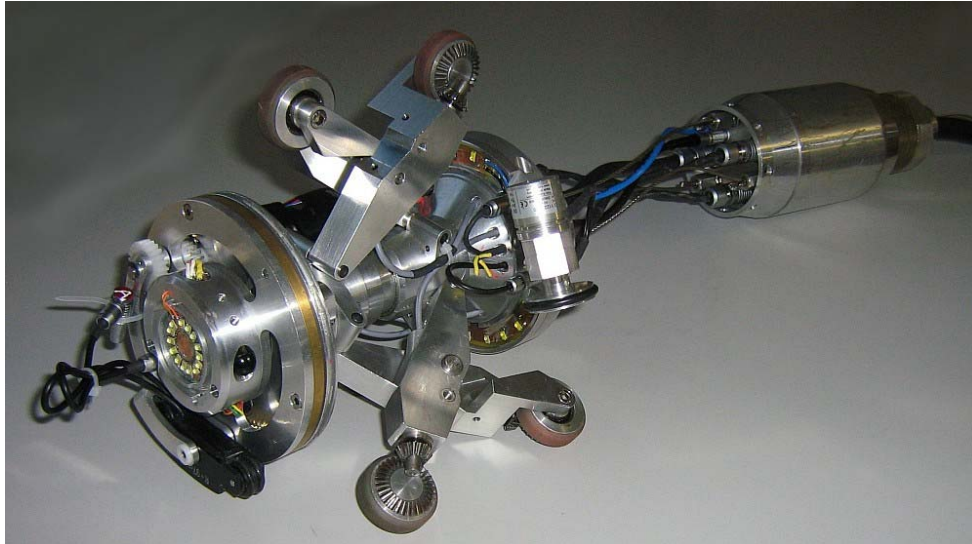


Abb. 5: Rohrrinnenmanipulator mit Rotationsmodul, Prüfsensorik und Steuerungsmodulen

### 3.3 Überblick Prüfsystem

Das gesamte Prüfsystem bestand aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten, die im Folgenden nur in Obergruppen genannt werden:

- mehrkanaliges Wirbelstrom-Universalprüfgerät mit X-Y- und Y-t-Darstellung mit zusätzlichem:
  - Computer zur Wirbelstrom-Datenverarbeitung mit geeigneter Software
  - Delta Test Rotationsmodul mit Steuerelektronik, Schwenkarm und Videokamera
  - Wirbelstromsensormodul
  - Softwaremodule zur Ansprache des Reglers, zur Darstellung und Steuerung der Videosignale
- Geräteträger (IBASS - Rohrrinnenmanipulator) mit sechs angetriebenen Rädern mit zusätzlichem:
  - Einsatzbereich  $\varnothing_n$  150 mm bis  $\varnothing_n$  250 mm
  - Schleppradsystem (am Geräteträger befestigt) zur Erfassung der Position über der Rohrlänge
  - PID-Regler mit integriertem Leistungsverstärker für den Antrieb des Geräteträgers
  - Steuerungssystem zur Energieversorgung des Systems Geräteträger-Elektronik-Rotationsmodul sowie zur Aufbereitung von Prüf-, Video- und Weginformationen
  - Verbindungskabel, die eine maximale Distanz zwischen Steuergeräten und Geräteträger (Messsystem) von max. 30 Metern ermöglichen
  - tatsächliche Einfahrtiefe: ca. 4 Meter
  - Verfahrbereich: um bis zu drei Rohrbögen herum
  - feinstufige Steuerung, die eine Spurbreite von 1 mm ermöglichte

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang die asynchrone Ansteuerung der Antriebsmotoren des Manipulators für eine bessere Positionierbarkeit und dass das Wirbelstromsensormodul im Schwenkarm des Rotationsmoduls integriert ist, wobei die Signalübertragung über ein Schleifringmodul erfolgt.

#### 4. Nachweis der Eignung und Prüfungsbedingungen

##### 4.1 Nachweis der Eignung der Prüftechnik

Aus den gemessenen Phasen- und Amplitudenwerten des Wirbelstromsignals sind in Relation zur Tiefe des Justierfehlers Kennlinien zu erzeugen. In Abhängigkeit von den Kennlinien ist der Auswertebereich festzulegen. Die Nachweisgrenze und die Genauigkeit der Fehlergrößenbestimmung sind dem Diagramm zu entnehmen und zu dokumentieren.

Gemäß KTA 3201.4 ist die Prüftechnik geeignet, wenn die geforderten Registrierungsschwellen den Störpegel um 6 dB oder mehr überschreiten und die Kennlinien mit der Tiefe des Bezugsmerkmals abhängig von der Prüftechnik eindeutig ansteigen oder eindeutig abfallen (Abb. 6).

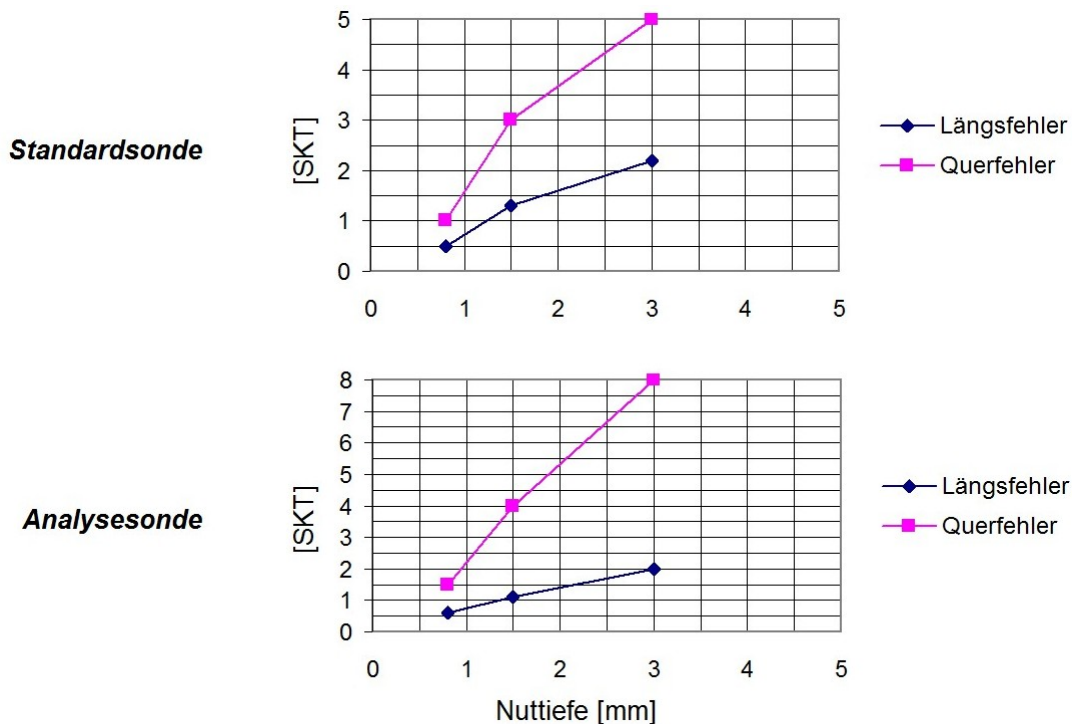


Abb. 6: Kennlinien Längs- und Querfehler Vergleichskörper B

##### 4.2 Registrier- und Zulässigkeitsgrenzen

Das Prüfsystem musste auftragsgemäß den Auflagen bzw. Prüfungsbedingungen der KTA 3201.4 in der Fassung 2010-11 genügen, also in der Lage sein, die im Folgenden genannte Prüfempfindlichkeit reproduzierbar und nachweislich zu erreichen [1]:

- Registrierschwelle: Signalthöhe des Vergleichsfehlers (s. Abschnitt „Justierfehler gemäß Prüfvorschrift“) zuzüglich eines Empfindlichkeitszuschlags von 6 dB
- Zulässigkeitsgrenze: unzulässig sind

- die Amplituden der Wirbelstromsignale, die die Registrierschwelle um 6 dB oder mehr überschreiten und deren Phasenlage im Auswertebereich liegt, sowie
- die Amplituden der Wirbelstromsignale, die die Registrierschwelle erreichen oder überschreiten und deren Phase im Auswertebereich liegt, wenn
  - die Anzeigemuster auf eine flächige Werkstofftrennung hinweisen oder
  - wenn die Länge 10 mm oder mehr beträgt, wobei die Längenausdehnung nach der Halbwertsmethode zu bestimmen ist.

Diese mehrfach differenzierten Festlegungen für die Zulässigkeitsgrenze bedeuten letztlich, dass Signale, die die Registriergrenze überschreiten, entweder durch einen sehr aufwändigen Algorithmus oder von Hand nachbewertet werden müssen.

## 5. Qualifizierung

Das vorgestellte Prüfsystem wurde vom TÜV Nord im Februar 2011 erfolgreich qualifiziert [5].

## 6. Anmerkungen zur Durchführung der Prüfungen vor Ort

Das qualifizierte Prüfsystem wurde jeweils über Armaturen in die zu prüfende Rohrleitung eingesetzt. Aufgrund der räumlichen Enge in den Armaturen bewies sich der konstruktive Zusatzaufwand zur Entkopplung von Prüfmolch und Steuereinheit als entscheidender Vorteil, weil sonst der Zugang nicht möglich gewesen wäre (Abb. 7).

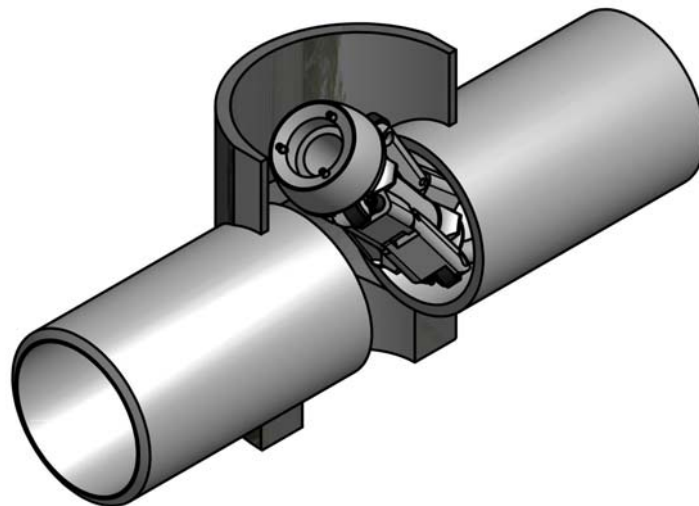


Abb. 7: Simulation der Zugänglichkeit für den Rohrinnenmanipulator

Wie bei Wirbelstromprüfungen üblich wurden vor und nach den Prüffahrten Ein- bzw. Ausjustierungen an den jeweils zum Prüfobjekt passenden Vergleichskörpern durchgeführt und dokumentiert (s. u.). Die Darstellung der Prüfergebnisse erfolgte anschaulich in Form von C-Bildern, wobei die zugrunde liegenden Wirbelstromrohdaten auch spurweise als Y-s- und X-Y-Daten dargestellt werden konnten.

Diese prüftechnische Vorgehensweise bedeutete, dass die prüftechnische Dauer vor Ort ca. vier Stunden für jeweils drei Schweißnähte im Prüfaufgabenbereich „austenitische Schweißnaht“ und „Mischnaht“ betrug. Aufgrund der Ein- und insbesondere Ausschleusung in den strahlentechnisch überwachungspflichtigen Kontrollbereich sowie der Transport- und Rüstzeiten ergaben sich Prüfdauern von insgesamt zwei Tagen.



## 7. Beispielhafte Prüfergebnisse

Im auftragsseitig vorgegebenen Zeitfenster wurden die Prüfungen vor Ort durchgeführt und u.a. die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse erarbeitet.

In Abbildung 8 wird deutlich, dass die Sensorik in der Lage ist, unterschiedlich orientierte Fehlerlagen mit nahezu identischer Empfindlichkeit zu detektieren.

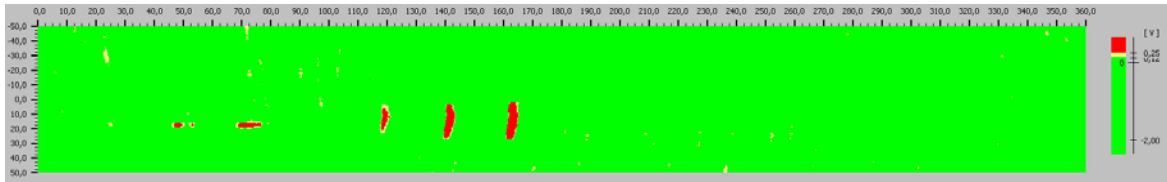


Abb. 8: Kontrollaufnahme des austenitischen Vergleichskörpers B

Anhand von Abbildung 8 und 9, die die Kontrollaufnahme des Vergleichskörpers B zeigen, können einige prüftechnische Aspekte näher betrachtet werden. Durch die Farbcodierung im C-Scan (rechts in Abb. 8) werden registrierpflichtige (gelb markiert) und unzulässige Bereiche (rot markiert) im Sinne einer vereinfachten Fehlerdarstellung farblich hervorgehoben (s. auch Abb. 10).

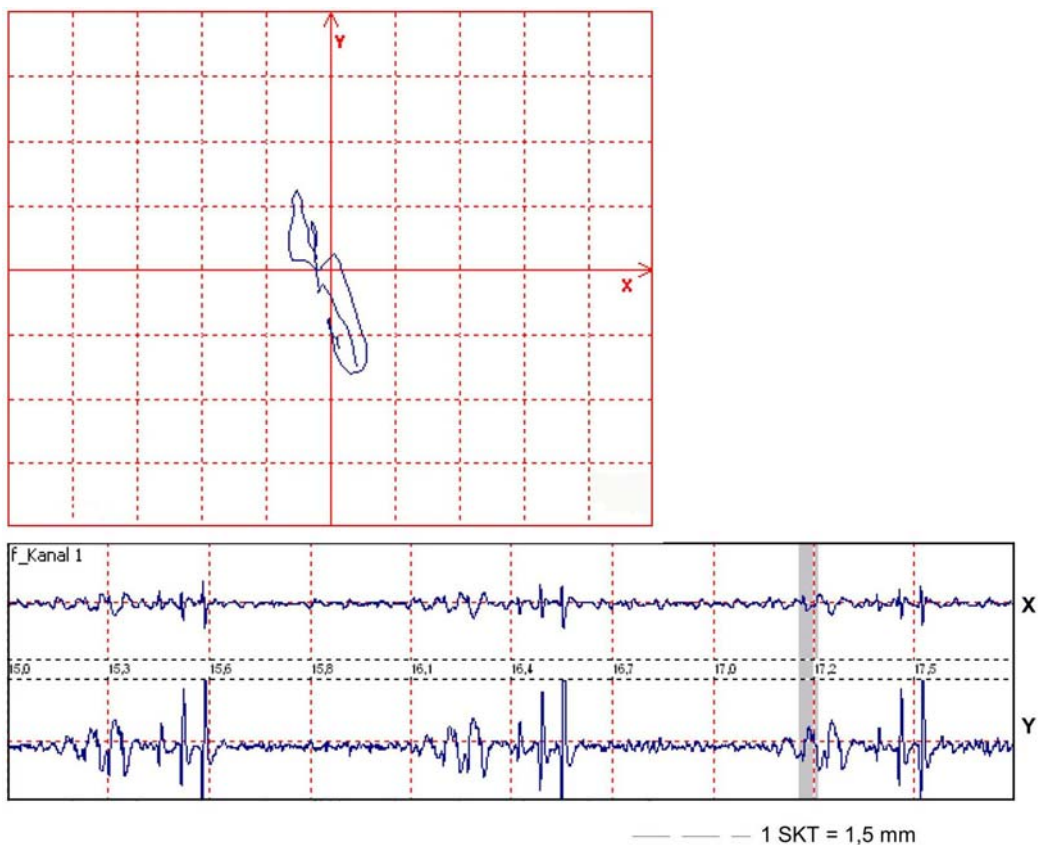


Abb. 9: X-Y- und X-s-/Y-s-Daten der vorigen Kontrollaufnahme des austenitischen Vergleichskörpers B

In Abbildung 9 wird jedoch im X-s-/Y-s-Schrieb deutlich, dass bei dieser Farbcodierung quasi eine zusätzliche Tiefpassfilterung der Wirbelstromsignale durchgeführt wird, da das in den weg-basierten Darstellungen enthaltene Schwanken der Daten im fehlerfreien Bereich unterdrückt wird. Diese oft fälschlich als Rauschen bezeichnete Schwankungsbreite der Wirbelstromdaten resultiert u.a. aus dem in den austenitischen Schweißnahtbereichen immer enthaltenen  $\delta$ -Ferrit, dessen Einfluss auf die Wirbelstromsignale zwar durch den

Einsatz einer Gleichstromvormagnetisierung bedämpft, aber nicht vollständig beseitigt werden konnte.

Diese materialbedingte Schwankungsbreite der Wirbelstromdaten wird auch im linken Bereich von Abbildung 10 (stellt den Spurbereich von ca. 16,7 bis 17,35 mm des Y-s-Schriebs von Abbildung 9 vergrößert dar) sichtbar, wobei es auch zur Überschreitung der Registriergrenze (gelber Bereich) kommt. Derartige Überschreitungen der Registriergrenzen müssen (wie in Abschnitt 4.2 ausgeführt) nachbewertet werden, d.h. die geforderte Empfindlichkeitserhöhung (Abschnitt 4.2, Registrierschwelle) erhöht in diesem Fall den Bewertungs- und damit den Prüfaufwand.



Abb. 10: Detail aus Y-s-Schrieb der vorigen Abbildung

Im rechten Teil von Abbildung 10 schließen sich an die materialbedingten kleineren Schwankungen die Signalverläufe für drei relativ dicht beieinander liegende Vergleichsfehlernuten von 0,8 mm, 1,5 mm und 3,0 mm Tiefe an. Dabei kommt es aufgrund des eingesetzten Bandpasses zu einem anfänglichen Überschwingen des Signals wie es der prinzipielle Signalverlauf zeigt. Da die Fehler sehr dicht aufeinanderfolgend im Vergleichskörper eingebracht wurden, verlaufen die Fehlersignale nahezu ineinander, wobei die Fehlersignale mit den überschwingenden Signalanteilen verwaschen.

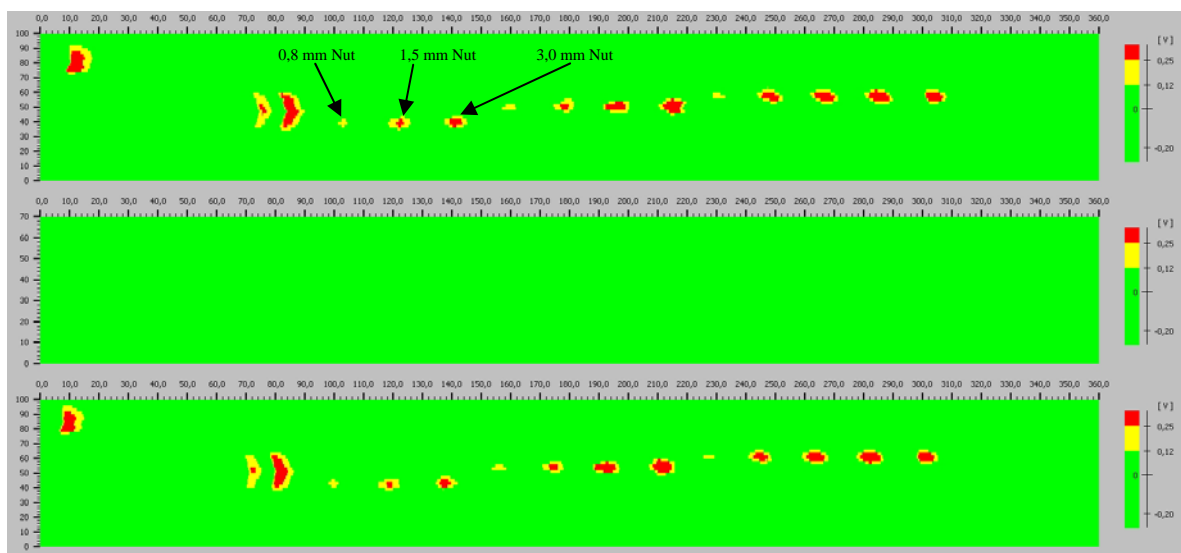


Abb. 11: Dokumentation eines exemplarisch ausgewählten Prüfverlaufs bei Einsatz des Detektionssensors (von oben nach unten: Einjustierung, Prüfobjekt, Ausjustierung)

Dabei ist es prinzipbedingt, dass sowohl die materialbedingten Schwankungen als auch die prüftechnisch bedingten Störsignale durch den Empfindlichkeitszuschlag von 6 dB auf die Signalhöhe des Bezugsfehlers gemäß der Forderung der KTA 3201.4 mit verstärkt werden. Dadurch wurde die Beherrschung der Signalqualität (Signal-Rauschverhältnis SNR) deutlich erschwert.

Die hier vorgestellten beispielhaften Kontrollprüfungen wurden (s. Abschnitt 6) vor und nach jeder Prüfung eines Prüfobjekts durchgeführt und protokolliert (Abb. 11). Wie oben ausgeführt überschreiten die kleinsten Vergleichsfehler (0,8 mm) gerade nur die Registrierschwelle. Die von der KTA 3201.4 geforderten Referenzfehler von 1,5 mm überschreiten die Zulässigkeitsgrenze deutlich (s. auch Abb. 8, 9 und 10).

Offensichtlich war das gezeigte Prüfobjekt befundfrei. Da auch die anderen Prüfobjekte befundfrei waren, wird darauf verzichtet weitere Ergebnisse zu zeigen.

## 8. Zusammenfassung

Als Teil der Fertigungsendprüfung sollten Rohrleitungen eines TK-Systems einer kerntechnischen Anlage mechanisiert mit Wirbelstrom von innen geprüft werden. Basierend auf den Erfahrungen früherer Rohrleitungsprüfprojekte wurden Wirbelstromprüftechniken qualifiziert, die geeignet sind, Mischschweißnähte und austenitische Schweißnähte auf Längs- und Querfehler in der inneren Oberfläche zu prüfen. Die implementierte Prüftechnik ermöglichte zuverlässig die gemäß KTA 3201.4 [1] geforderten Vergleichsfehler sowohl in der Wärmeeinflusszone als auch in der Schweißnaht nachzuweisen. Die Eignung der Prüftechniken gemäß KTA3201.4 wurde erfolgreich nachgewiesen und die Prüfaufgabe im vorgegebenen Zeitfenster erfolgreich durchgeführt. Es wurden keine Signale gefunden, die die Registriergrenzen überschritten.

## Referenzen

- [1] *KTA 3201.4 - Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung*, Fassung 2010-11
- [2] Heutling, Bernd; Behr, Ulrich von; Sievert, Werner; *Eddy current inspection of Pipes by means of Wire-Guided Crawlers*; LRUCM-Seminar; Saarbrücken; 2008
- [3] Heutling, Bernd; Behr, Ulrich von; Rös, Ulrich; Sailer, Johann; Strasser, Michael; *Mechanisierte Wirbelstromprüfung mit Innenrotiersonde an austenitischen Rohrleitungen*; DGZfP-Berichtsband; DGZfP-Jahrestagung; Fürth; 2005
- [4] Stroppe, H.; Schiebold, K.; „*Wirbelstrom-Materialprüfung*“, Castell-Verlag, ISBN 978-3-934255-49-4
- [5] Delta Test GmbH: *Qualifizierungsbericht „Qualifizierung einer mechanisierten Wirbelstromprüftechnik mit Rotiersonde zur Oberflächenprüfung von Schweißnähten an austenitischen Rohrleitungen von innen“*; 02/2011