

Röntgen-Tomographische In-Service-Prüfung von Rundschweißnähten – Das Europäische Projekt TomoWELD –

Uwe EWERT¹, Bernhard REDMER¹, David WALTER¹, Kai-Uwe THIESSENHUSEN¹,
Carsten BELLON¹, P. Ian NICHOLSON², Alan CLARKE², Klaus-Peter FINKE-
HÄRKÖNEN³, Jörg W. SCHARFSCHWERDT⁴, Karsten ROHDE⁴

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² TWI Technology Centre, Port Talbot, Großbritannien

³ Ajat Oy Ltd., Espoo, Finnland

⁴ AREVA GmbH, Erlangen

Kurzfassung

Der neue Standard ISO 17636-2:2013 „ZfP von Schweißnähten – Durchstrahlungsprüfung - Teil 2: Röntgen- und Gammastrahlungstechniken mit digitalen Detektoren“ definiert die Prüfpraxis für die digitale Radiographie von Schweißnähten für die Herstellung und In-Service-Prüfung. Außerdem wurde die DIN 25435-7:2014 „Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren - Teil 7: Durchstrahlungsprüfung“ veröffentlicht. Die wesentlichen Anforderungen werden diskutiert. Die neue TomoWELD-Anlage kann sowohl Messungen nach diesen Normen durchführen als auch tomographische Querschnittsbilder (äquivalent zu Schlifften) aufnehmen, um Anzeigengrößen zu bestimmen. Anwendungsbereiche sind chemische und kerntechnische Anlagen. Sie ermöglicht eine schnelle Prüfung von Rundschweißnähten im Vergleich zur Verwendung von Film oder Speicherfolien. Im Jahr 2006 wurde bereits die mechanisierte Planartomographie-Anlage, TomoCAR, eingeführt [1,2], mit der Querschnittsbilder gemessen werden konnten. TomoWELD nutzt einen neuen photonenzählenden und energieauflösenden Detektor mit CdTe-CMOS-Kristallhybriden. Der neue Detektor gestattet die Wahl von Energieschwellen und ermöglicht die Reduktion des Einflusses der Streustrahlung auf die Durchstrahlungsbilder und die rekonstruierten Querschnittsbilder. Eine optimierte Durchstrahlungsgeometrie mit einem neuen Manipulatorendesign und ein schneller GPU-basierter Rekonstruktionsalgorithmus werden verwendet, um die Rekonstruktion zu beschleunigen und die Rekonstruktionsergebnisse zu verbessern. Die Größe und die Form von planaren und voluminösen Unregelmäßigkeiten können bestimmt werden. Das Konzept und die ersten Bilder werden vorgestellt.

Reference:

- [1] Bernhard Redmer, Uwe Ewert, Burkhard Neuendorf, Michael Jakob, 9th ECNDT, 25. – 29. Sept. 2006, Berlin, Germany, <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.3.2.3.pdf>.
- [2] Uwe Ewert, Bernhard Redmer Christoph Rädels, Ulf Schnars, Rudolf Henrich, Klaus Bavendiek and Mirko Jahn, Materials Transactions, Vol. 53, No. 2 (2012) pp. 308 to 310.



BAM Berlin



KKW Neckarwestheim



Röntgen-Tomographische In-Service-Prüfung von Rundschweißnähten – Das Europäische Projekt TomoWELD –

U. Ewert¹, B. Redmer¹, D. Walter¹, K.-U. Thiessenhusen¹, C. Bellon¹,
P.I. Nicholson², A. Clarke², K.-P. Finke-Härkönen³, J.W. Scharfschwerdt⁴,
K. Rohde⁴,

¹BAM, Berlin, Deutschland, ²TWI, Port Talbot, Großbritannien, ³Ajat Oy, Espoo,
Finnland, ⁴AREVA, Erlangen, Deutschland

uwe.ewert@bam.de

Inhalt

- Vorarbeiten und ENIQ-Qualifizierung mit TomoCAR bis 2010
- Prinzip Planar-Tomographie
- EU-Projekt TomoWELD
 - Modellierung komplexer Röhren-, Detektor und Objektpositionierung zur Optimierung der Durchstrahlungsgeometrie
 - Manipulator
 - Photonen-zählender Detektor
 - Flache Röntgenröhre
 - Rekonstruktionssoftware
- Labortests in der BAM und
- Feldtests in einem Kernkraftwerk

Vorarbeiten zur mobilen Planar-Tomographie für Rohrschweißnähte

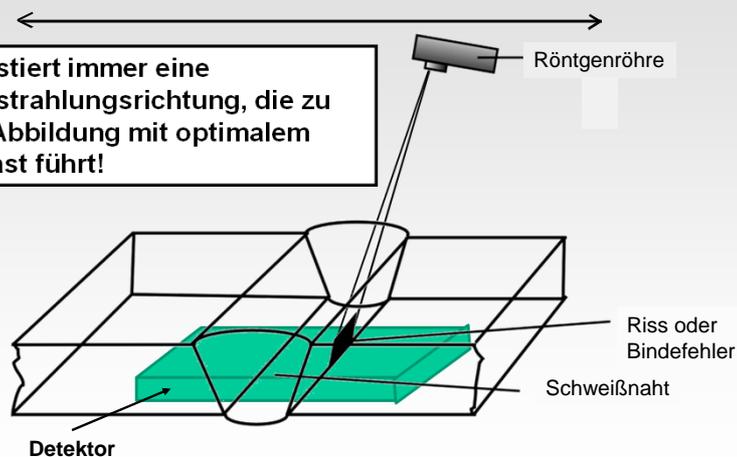
- Vorarbeiten bis 2010 und ENIQ – Qualifizierung
 - TomoCAR im Auftrag des VGB PowerTech e.V. (2000)
 - Analysescanner mit 45° Übersichtsscan zur Auffindung bekannter Bereiche mit unklaren Anzeigen.
 - Planar-Tomographie (auch: Koplanare Translationslaminographie) zur Analyse von **Längsrissen in Rundschweißnähten** bezüglich Form und Abmessung in Länge und Tiefe: **Zerstörungsfreie Schliffbilder!**
 - 2004 ENIQ-Qualifizierung für Einsatz in KKWs
 - Letzter Einsatz vor „Fukushima“ in KKWs in Deutschland und Schweiz



Prinzip der Planar-Tomographie

Aufgabe: Zuverlässiger Nachweis flächiger Unregelmäßigkeiten

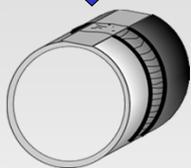
Es existiert immer eine Durchstrahlungsrichtung, die zu einer Abbildung mit optimalem Kontrast führt!



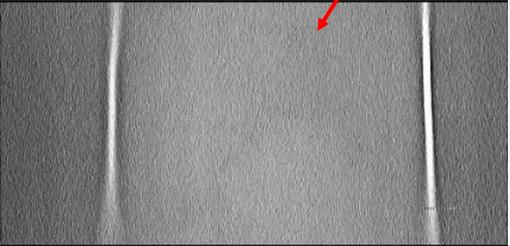
3D-Rekonstruktion von Querschnittsbildern
 – Bewertung durch ENIQ -

Zertifizierung durch
European
Network of
Inspection and
Qualification.

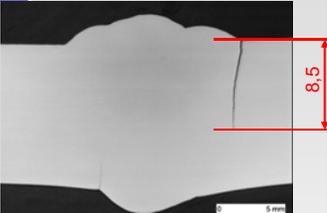
Erfolgreiche Qualifizierung
2004 abgeschlossen



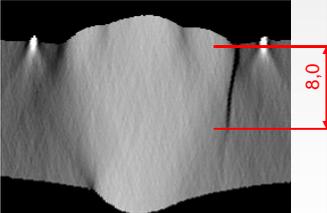
von außen nach innen



Metallographie



Planar-Tomographie



8.3 Radiologische Verfahren
TomoWELD
Mai 2015
Ewert et al.
5


Projekt TomoWELD

- EU-Projekt "TomoWELD" für die Kerntechnik mit neuen modernen Baugruppen
<http://www.tomoweld.eu/home/>
 - Modellierung der Scaengeometrie und Scanparameter mit aRTist
 - Manipulator für 360° Scan und Planar-Tomographie für Längs- und Querrisse (AREVA)
 - Photonenählender und energiediskriminierender Detektor (Ajat, XCounter)
 - Flache Röntgenröhre mit verkleinerter Stromversorgung und Kühlung (rtw)
 - Neue und schnelle Rekonstruktions-Techniken,
 - Multiplikative S-ART (next to base plane)
 - Schnelle GPU-basierte „Filtered Shift Average“ Rekonstruktion (BAM, 8 Sekunden statt 35 Minuten für 100 MVoxel)
- Projekt-Partner

• NEXUS	http://www.nexus-bg.com/	Bulgarien Prüffirma
• PTP	http://www.ptpart.co.uk/	UK Softwarefirma
• TWI	http://www.twi-global.com/	UK Forschungsinstitut
• AJAT	http://www.ajat.fi/	Finnland Detektorhersteller
• InnospeXion	http://www.innospeXion.dk/	Dänemark Systemintegrator
• BAM	http://www.bam.de/	Deutschland Forschungsinstitut
• AREVA	http://www.areva.com/	Deutschland/Frankreich Endnutzer
• rtw	http://www.rtwray.de/	Deutschland Röhrenhersteller

8.3 Radiologische Verfahren
TomoWELD
Mai 2015
Ewert et al.
6


Modellierungswerkzeuge zur Experimentoptimierung: TomoSynth & TomoBox

TomoSynth

- einfaches GUI
- Preview & Postview
- kann komplexe Bewegungen von Objekt, Röhre und Detektor modellieren
- integriert in aRTist

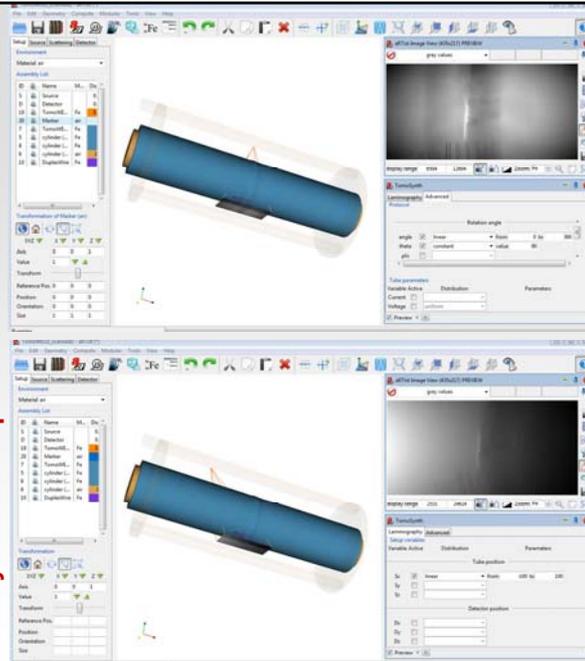
TomoBox

- schnelle gefilterte und gewichtete Shift-Average-Rekonstruktion
- individuelle Einstellung der Filterung und Rekonstruktion

**Integrierte Umgebung
für simulierte Tomosynthese**

U. Ewert, D. Fratzscher, B. Redmer, K.-U. Thiessenhusen, C. Bellon, Ch. Gollwitzer, Konferenz NDT in Aerospace, Hamburg, Nov. 2010.

Animation einer Modellierserie mit verschiedenen Bewegungsabläufen von Objekt und Quelle
Analytical RT inspection simulation tool - aRTist



Optimierung der Durchstrahlungsparameter:

- Abstände
- Brennfleck
- Targetwinkel
- Scan-Distanzen

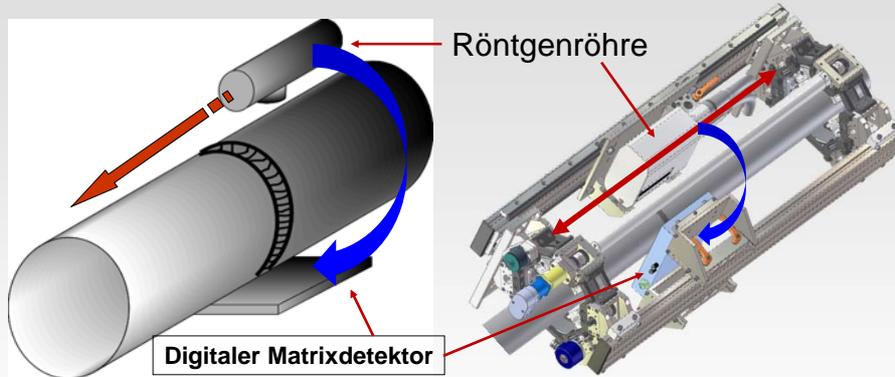
Modellierung

des 360°
Übersichtsscans
nach ISO 17636-2
und DIN 25435-7

Modellierung

des Planar-
Tomographie-Scans

Planar-Tomographie – Manipulator



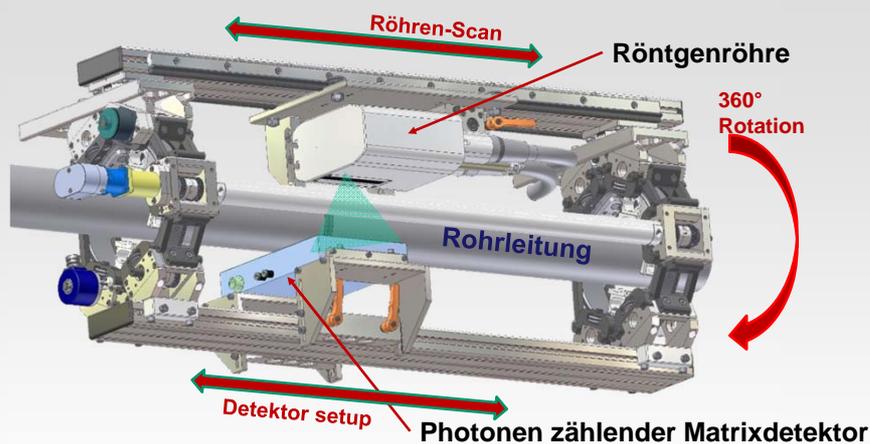
Planar-Tomographie:

Bewegung der Röhre parallel zur Rohrachse oder im vorgegebenem Winkel

Übersichts-Scan:

Rotation von Detektor und Röhre um die Rohrachse (360°)

TomoWELD-Manipulator



Schritte zur 3D Rekonstruktion

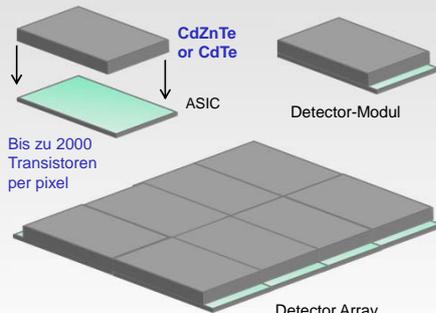
- Verschiebung der Röntgenröhre schräg zur Rohrachse
- Erfassung mehrerer hundert Projektionen
- Rekonstruktion

- Manipulator: AREVA
- Röntgenröhre: rtw
- Detektor: XCounter/Ajat

Photonenzählender und energiediskriminierender Matrixdetektor

Für medizinische und ZfP-Anwendungen

- "Dual energy" - Prüfung
- Hohe Dickendynamik (32 bit)
- CdTe oder CdZnTe- Detektoren bis 300 kV für ZfP



"PDT 25" (XCounter/Ajat, Sweden/Finnland)
 "WidePIX" (IEAP CTU in Prague, Czech)
 "PILATUS" (PSI/SLS, Switzerland)
 "XPAD" (CNRS, France)
 "MEDIPIX" (CERN)
 "LAD" (RAL, UK)
 "MPEC" (Univ. Bonn, Germany)

8.3 Radiologische Verfahren

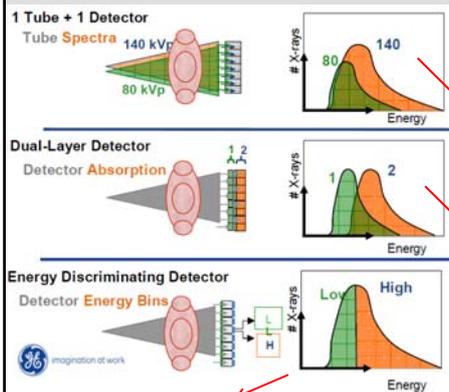
TomoWELD

Mai 2015
Ewert et al.

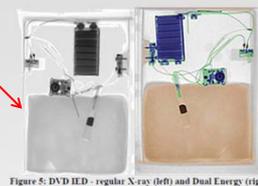
11



Photonenzählender und energiediskriminierender Matrixdetektor



"Dual Energy" - Radiographie und CT



Material - Unterscheidung

Vidisco:
Unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtungen

Smiths Heimann:
Gepäckprüfung



Blau – Metall
 Grün – Anorganische Materialien, sowie Cl, F, Br enthaltende Kunststoffe
 Orange bis gelb – organische Materialien und Sprengstoffe

8.3 Radiologische Verfahren

TomoWELD

Mai 2015
Ewert et al.

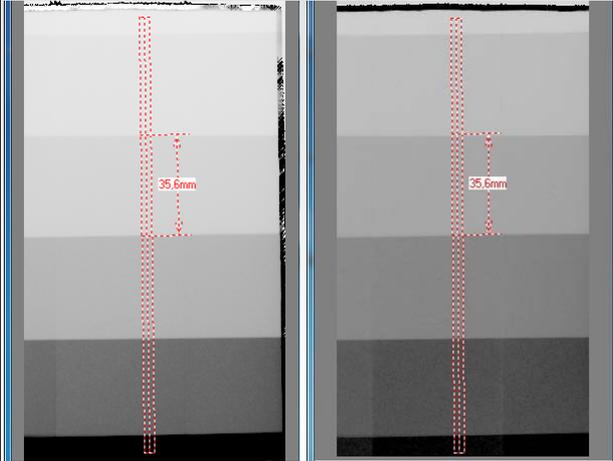
12



Photonenzählender und energiediskriminierender Matrixdetektor

Beispiel: Reduktion der Streustrahlung

Fe-Stufenkeil, 160 kV, Schwellwert ca. 80 keV
 Niedrigenergie-Bild < 80 keV Hochenergie-Bild > 80 keV



Niedrig-Energie-Profil
 Hoch-Energie-Profil



8.3 Radiologische Verfahren

TomoWELD

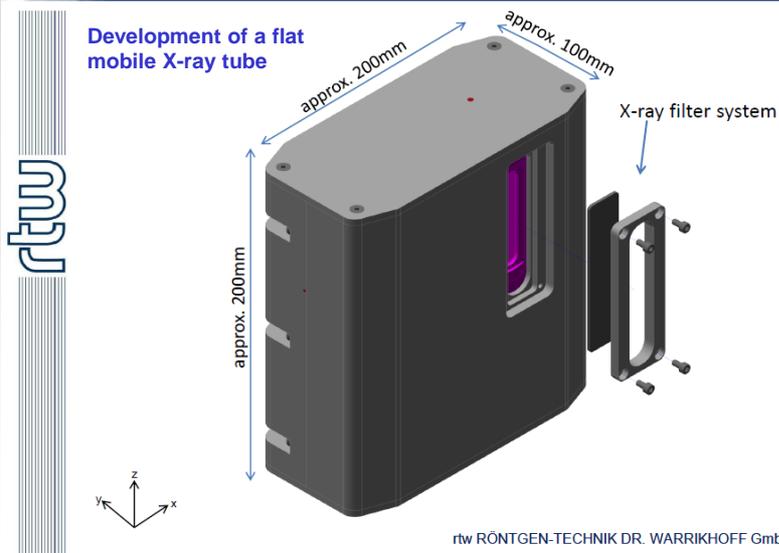
Mai 2015
 Ewert et al.

13



X-ray Tube MC2T TomoWeld

Development of a flat mobile X-ray tube



rtw RÖNTGEN-TECHNIK DR. WARRIKHOFF GmbH & Co. KG

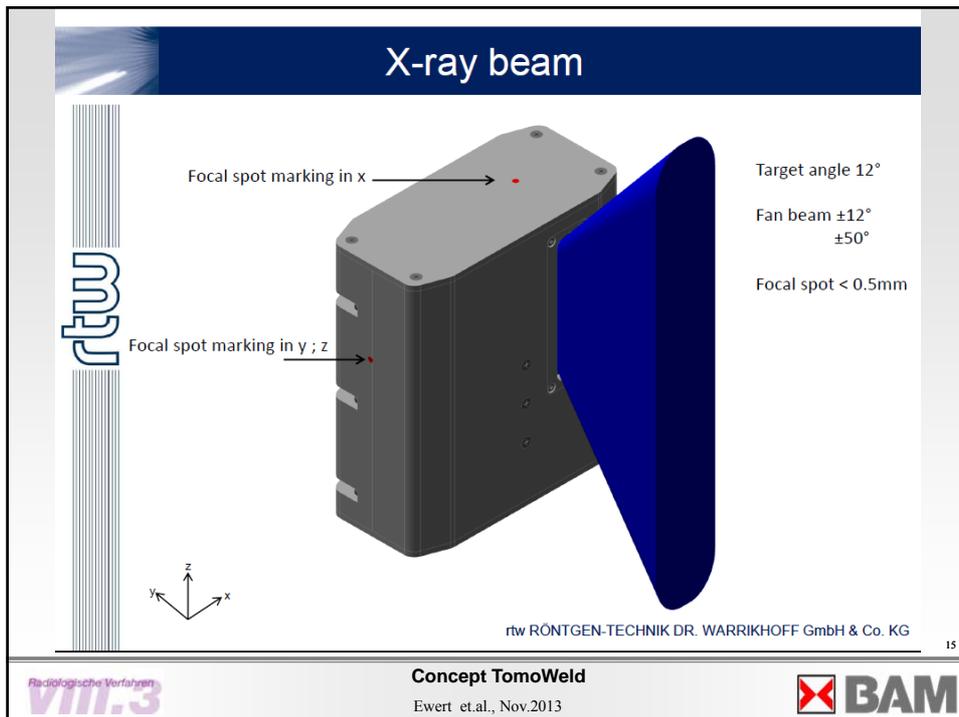
14

radiologische Verfahren
 VIII.3

Concept TomoWeld

Ewert et al., Nov.2013





Rekonstruktionsverfahren

Reduktion der Artefakte durch „next to base plane“ multiplikative ART

Limited View / Eingeschränktes Blickfeld

- Keine Information aus totem Winkel verfügbar
- Aber genügend Projektionen im Beobachtungsbereich vorhanden

Artefakte

- Kreuzartefakte** treten sowohl bei der „Filtered Shift Average“ - Methode als auch bei der SART auf.
- Bei beiden Verfahren gibt es ein „Überschwingen“ der Intensitäten an scharfen Strukturen.

Gefilterte Rückprojektion

SART

Neues „Next to Base Plane“
MART-Verfahren zur
Unterdrückung von Artefakten

Kreuzartefakte

U. Ewert, B. Redmer, K.-U. Thiessenhusen, DGZFP-Jahrestagung, Dresden, Mai 2013.

8.3 Radiologische Verfahren **TomoWELD** Mai 2015 Ewert et al. 16 **BAM**

Schnelle Shift Average-Methode mit GPU

➤ Beschleunigung der Rekonstruktionszeit und Artefaktreduktion

➤ Rechenzeit ist proportional zu:

- Projektionszahl
- Pixelzahl
- Zahl der Rekonstruktionsebenen

➤ Beispiel:

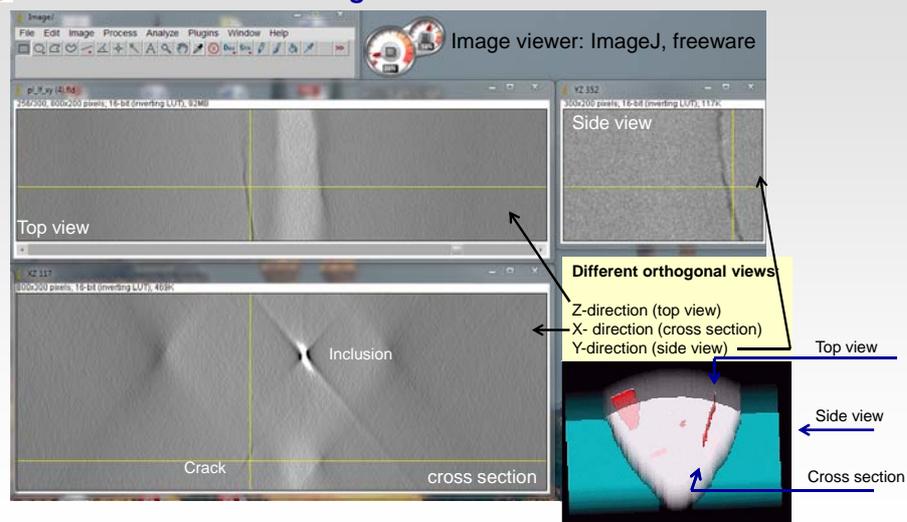
- 700 Projektionen, 1120 x 1184 Pixel, 300 Rekonstruktionsschichten

➤ Rechenzeiten:

- 20 min (gefilterte Kegelstrahl-Rückprojektion auf 4 CPU Kernen)
- 25 sec (shift average Algorithmus mit GPU auf dem selben PC)

Labortests an ferritischer Schweißnaht

➤ Test Weld: Crack and Tungsten Inclusion



Labortests an austenitischer Schweißnaht

► Planar-Tomographie zur Analyse und besseren Bewertung

- Tests wurden durchgeführt im
 - Wanddickenbereich (WD) von 10 mm bis 35 mm in Doppelwandanordnung und im
 - Durchmesserbereich von 100 bis 350 mm.



Laminographie, 800 Projektionen, 2 Sekunden Messzeit je Projektion, 26 Min. Scanzeit bei WD bis 15 mm
Bei 35 mm WD ca. 3 h Scanzeit mit 270 kV.

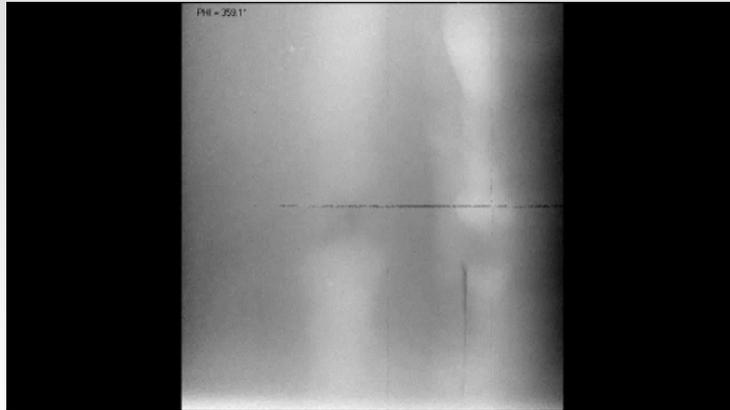
Labortests an austenitischer Schweißnaht

► Planar-Tomographie zur Analyse und besseren Bewertung



Labortests an austenitischer Schweißnaht

► Übersichtsaufnahme



Übersichtsaufnahme (360° Scan) nach ISO 17636-2 und DIN 25435-7 als Ersatz für die Filmradiographie

- Prüfkategorie B-ND
- 190 kV, austenitisches Testrohr: WD 10 mm, Durchmesser 100 mm

Labortests an austenitischer Schweißnaht

► 3D Rekonstruktion - 190 kV, Austenitisches Testrohr: WD 10 mm, Durchmesser 100 mm



▶
Wanddicke
13 mm

Decklagen-
Anzeigenlänge
22,4 mm

Risslänge
22,6 mm
Risstiefe
3,3 mm

Feld-Test im Kernkraftwerk

Test des TomoWELD-Scanners im KKW an einer Leitung des Sekundärkreislaufs, Block I



Montage des Manipulators an Rohrleitung



Block I ist außer Betrieb seit 2011

Block II wird spätestens Ende 2022 abgeschaltet

www.enbw.com/kernkraft

8.3 Radiologische Verfahren

TomoWELD

Mai 2015
Ewert et al.

23



Feld-Test im Kernkraftwerk

Test des TomoWELD-Scanners im KKW an einer Leitung des Sekundärkreislaufs, Block I



Schweißnaht Röhre

Detektor

Anlage ist durch Kunststoff-Folien geschützt gegen radioaktive Kontamination.

Ein- und Ausschecken dauerte insgesamt 2 Tage.

Aufbau und Messungen erfolgten an 2 Tagen.

8.3 Radiologische Verfahren

TomoWELD

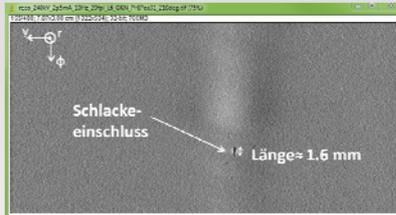
Mai 2015
Ewert et al.

24



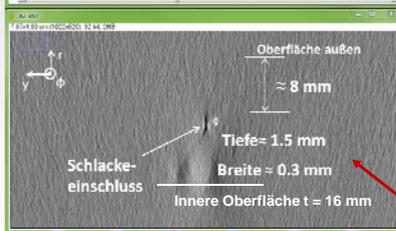
Feld-Test im KKW und Bewertung

TomoWELD-Scan im KKW an einer Leitung des Sekundärkreislaufs, Block I



Die Bewertung in drei Blickrichtungen gestattet die Bewertung der Schweißqualität nach verschiedenen Standards

KTA 3211.4 (2013-11) in service
ISO 5817 für Querschnittbild
ISO 10675 für Übersichtsaufnahme nach DIN 25435-7



Die Anzeigen sind im zulässigen Rahmen und deckungsgleich mit den Aufnahmen der Durchstrahlungsprüfung, die vor Inbetriebnahme durchgeführt wurde.

2011	Pore	ISO 5817	Bewertungsgruppen		
301	Schlacke		D	C	B
Größtmaß der Unregelmäßigkeit in der Querschnittsfläche bezogen auf die gebrochene Oberfläche. <u>Standard ist fertigungsbezogen!</u>					$\leq 0,2$ s, max. 3 mm
					max. 2 mm

Zusammenfassung

- Die Anwendung der mobilen Planar-Tomographie als Analysetool wurde 2004 für die Anwendung in der Kerntechnik für „TomoCAR“ durch ENIQ qualifiziert.
- Das TomoCAR-System wurde akzeptiert zur Bewertung der Anzeigenform und Anzeigendimension in 3 Raumrichtungen für planare Unregelmäßigkeiten mit 25 μ m Öffnung und einer Tiefenangabe mit ± 1 mm Genauigkeit bei austenitischen Röhren.
- Das EU-Projekt TomoWELD wurde zur Modernisierung der mechanisierten Schweißnahtprüfung gefördert:
 - Modellierung zur Optimierung der Hardware zur Detektion von Längs- und Querrissen mit aRTist,
 - neuer Manipulator (AREVA),
 - photonenzählenden und energiediskriminierenden Detektor (Ajat, XCounter),
 - flache Röntgenröhre (rtw),
 - neue, schnelle Rekonstruktionssoftware und -algorithmen (BAM).
- Labortests wurden für ferritische und austenitische Rohrleitungen durchgeführt:
 - Der Übersichtsscan auf der Basis der EN ISO 17636-2 und DIN 25435-7 in der Prüfkategorie B-ND kann erfolgreich für Rohrleitungen mit 100 - 350 mm Durchmesser und 10 - 35 mm Wanddicke durchgeführt werden.
 - Prüfung mit Film oder UT sind vorher nicht erforderlich.
 - Anzeigen können durch die Planar-Tomographie quantitativ vermessen und nach Norm bewertet werden.

Danksagung:

Wir danken der EU für die Förderung durch den EU grant "agreement no. 315213 for collaborative projects FP7-SME 2012"

Wir danken der Firma **Röntgentechnik Dr. Warrikhoff** für die Unterstützung bei der Entwicklung von neuen Teströntgenröhren

Wir danken der Firma **XCounter** für die Entwicklung und Unterstützung bei der Implementierung des Photonen zählenden und Energie diskriminierenden Matrix-Detektors

Wir danken der **EnBW Kernkraft GmbH** für die Unterstützung beim Feld-Test.

Wir sind zu besonderem Dank verpflichtet für das Engagement und die Unterstützung:

C. Heil, EnBW	K. Spartiotis, Ajat
Y. Stoltz, EnBW	K. Perez, Ajat
M. Grunwald, BAM	C. Ullberg, XCounter
S. Hohendorf, BAM	S. Gunn, XCounter
M. Tschaikner, BAM	W. Zeike, AREVA
U. Zscherpel, BAM	M. Urech, XCounter
A. Warrikhoff, rtw	T. Pantsar, Ajat
J. Meyer, rtw	



ENDE

www.bam.de
uwe.ewert@bam.de